

**ВІЙСЬКОВИЙ ІНСТИТУТ
КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
ВІЙСЬКОВОГО ІНСТИТУТУ КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

Виходить 4 рази на рік

№ 84

Згідно Наказу МОН №1188 від 24.09.2020, п. №156 Додатку 5 «Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка» включено до категорії «Б» за спеціальностями:

- 124 – «Системний аналіз»;
- 126 – «Інформаційні системи та технології»
- 254 – «Забезпечення військ (сил)»
- 255 – «Озброєння та військова техніка»

КИЇВ – 2024

ISSN 2524-0056 (Print)

ISSN 2519-481X (Online)

**MILITARY INSTITUTE OF TARAS SHEVCHENKO NATIONAL
UNIVERSITY OF KYIV**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS
OF THE MILITARY INSTITUTE OF TARAS SHEVCHENKO
NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV**

It comes out 4 times a year

№ 84

According to the Order of the Ministry of Education and Science No. 1188 from 09/24/2020, item No. 156 of Appendix 5 «Collection of scientific works of the Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv» is included in category «B» by specialties:

124 – «System analysis»;

126 – «Information systems and technologies»

254 – «Supply of troops (forces)»

255 – «Armament and military equipment»

KYIV – 2024

УДК621.43

ББК 32-26.8-68.49

Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. К.: ВІКНУ, 2024. № 84. 140 с.

Голова редакційної колегії:

Ленков С.В.

доктор технічних наук, професор, ВІКНУ;

Члени редакційної колегії:

Анісімов А.В.

доктор фізико-математичних наук, професор, член-кор. НАНУ, КНУ;

Барабаш О.В.

доктор технічних наук, професор, НТУУ КПІ;

Гунченко Ю.О.

доктор технічних наук, професор, ОНУ;

Жиров Г.Б.

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, КНУ;

Заславський В.А.

доктор технічних наук, професор, КНУ;

Карпінський М.П.

доктор технічних наук, професор, УНТ, Краків (Польща)

Лепіх Я.І.

доктор фізико-математичних наук, професор, ОНУ;

Петров О.С.

доктор технічних наук, професор, УНТ, Краків (Польща);

Погорілий С.Д.

доктор технічних наук, професор, КНУ;

Толок І.В.

кандидат педагогічних наук, доцент, НУЦЗУ;

Хайрова Н.Ф.

доктор технічних наук, професор, Університет Умеа (Швеція);

Хлапонін Ю.І.

доктор технічних наук, професор, КНУБА;

Шаронова Н.В.

доктор технічних наук, професор, НТУ ХПІ.

Редакційна колегія прагне до покращення змісту та якості оформлення видання і буде вдячна авторам та читачам за висловлювання зауважень і побажань.

Зареєстровано Міністерством юстиції України, свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації – серія КВ № 11541 – 413Р від 21.07.2006 р.

Відповідно до Наказу МОН України від 24.09.2020 № 1188 «Збірник наукових праць ВІКНУ імені Тараса Шевченка» внесено до категорії «Б» (технічні науки).

Затверджено на засіданні Вченої ради ВІКНУ від 21.11.24 р., протокол № 3.

Відповідальний за макет:
Сотніков Є.О.

Відповідальність за новизну і достовірність наведених результатів, тактико-технічних та економічних показників і коректність висловлювань несуть автори. Точка зору редколегії не завжди збігається з позицією авторів. Усі матеріали надруковані в авторській редакції.

Усі статті, що публікуються у збірнику, проходять обов'язкове рецензування, яке здійснюється за анонімною формою як для авторів, так і для рецензентів. Незважаючи на перевірку статей на антиплагіат остаточною відповідальністю за плагіат несуть автори.

Видання безкоштовне.

Примірники збірників знаходяться у Національній бібліотеці України ім. В.І. Вернадського, у науковій бібліотеці ім. М. Максимовича, у бібліотеці Військового інституту та в наукових бібліотеках України згідно списку МОН. Електронна версія збірника розміщена на відповідних сайтах.

Видання індексується Google Scholar.

Адреса редакції: 03189, м. Київ, вул. Ю. Здановської, 81, тел./факс +38 (044) 521 – 33 – 82

Наклад 50 прим. Ел.адреса редактора: lenkov_s@ukr.net

Офіційний сайт журналу: <http://miljournals.knu.ua>

Chairman of the editorial board:

Lienkov S.V. doctor of technical sciences, professor, VIKNU;

Members of the editorial board:

Anisimov A.V. doctor of physics and mathematics, professor, corresponding member of NASU, KNU;
Barabash O.V. doctor of technical sciences, professor, NTUU KPI;
Gunchenko Yu.O. doctor of technical sciences, professor, ONU;
Zhyrov G.B. candidate of technical sciences, senior researcher, KNU;
Zaslavsky V.A. doctor of technical sciences, professor, KNU;
Karpins'kyj M.P. doctor of technical sciences, professor, UNT, Krakow (Poland)
Lepikh Ya.I. doctor of physics and mathematics, professor, ONU;
Petrov O.S. doctor of technical sciences, professor, UNT, Krakow (Poland);
Pogorilyy S.D. doctor of technical sciences, professor, KNU;
Tolok I.V. candidate of pedagogical sciences, docent, NUCP
Khairova N.F. doctor of technical sciences, professor, Umea University (Sweden);
Khlaponin Yu.I. doctor of technical sciences, professor, KNUBA;
Sharonova N.V. doctor of technical sciences, professor, NTU KhPI.

The editorial board strives to improve the content and quality of the publication and will be grateful to the authors and readers for their comments and wishes.

Registered by the Ministry of Justice of Ukraine, certificate of state registration of printed mass media – KV series No. 11541 – 413P from 07/21/2006.

In accordance with the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine from September 24, 2020 No. 1188, «Collection of Scientific Works of the Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv» is included in category «B» (technical sciences).

Approved at the meeting of the Scientific Council of VIKNU from 21.11.2024, protocol No3.

Responsible for the layout:
Sotnikov Y

The authors are responsible for the novelty and reliability of the given results, tactical-technical and economic indicators and the correctness of statements. The point of view of the editorial board does not always coincide with the position of the authors. All the materials are printed in the author's edition.

All articles published in the collection undergo a mandatory review, which is carried out anonymously for both authors and reviewers. Despite checking the articles for anti-plagiarism, the final responsibility for plagiarism lies with the authors. The publication is free.

Copies of the collections are in the National Library of Ukraine named after V.I. Vernadsky, in the scientific library named after M. Maksymovych, in the library of the Military Institute and in the scientific libraries of Ukraine according to the list of the Ministry of Education and Science. The electronic version of the collection is posted on the relevant websites.

The publication is indexed by Google Scholar.

Address of the editorial office: 03189, Kyiv, str. Y. Zdanovska, 81, phone/fax +38 (044) 521 – 33 – 82
Edition of 50 copies. E-mail address of the editor: lenkov_s@ukr.net
Official website of the journal: <http://miljournals.knu.ua>

ЗМІСТ

ВІЙСЬКОВА ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Banzak O.V., Lienkov S.V., Sieliukov O.V., Grabovsky O.V. Modeling detector for radiation monitoring systems	7
Nazarenko A.A., Banzak G.V., Lienkov S.V., Sieliukov O.V. Development of a reliability model for a complex technical object	21
Гайша О.О., Онищенко О.А., Гайша О.О. Моделювання водної поверхні в умовах морського хвилювання на основі вейвлет-подібних функцій	31
Зайцев Д.В. Робота штабу щодо розрахунку бойових спроможностей механізованого підрозділу та методика визначення імовірності ураження цілі сучасними засобами безпілотних авіаційних комплексів	39
Маміч В.В., Максименко Ю.А., Дідик В.О., Шершаткін Д.Ю., Душкін Ю. Г. Дослідження методології аналізу розвідувальної інформації	47
Михайленко В.С., Гунченко Ю.О., Лещенко В.В., Зуй О.М. Методика синтезу нечіткої адаптивної системи управління складним об'єктом	54
Яковенко В.В., Іванцов В. П., Макаліш О. В. Аналіз впливу осколкових полів радіально-осьових осколково-фугасних снарядів на живу силу противника	67

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Danso J.O., Druzhynin V.A. The integration of iot and mathematical models in climate change mitigation	74
Кузавков В.В., Солодовник В.І., Лапа В.І. Інтеграція об'єкта тз-вз в автоматизовану систему управління вогнем артилерії	82
Михальчук В. В., Дружинін В. А. Пригнічення когнітивних упереджень під час ідентифікації особи та її наміру в нейро-комп'ютерних системах	91
Охрамович М.М., Гахович С.В., Коваль М.О., Кравченко О.І. Аналіз і оцінка функціонування сенсорних мереж в умовах задової обстановки та кібервпливу	106
Трутнев С.Г. Підходи щодо зменшення похибок при обчисленні математичних моделей бойових дій в комп'ютерних системах імітаційного моделювання	115

Дані про авторів	128
Алфавітний покажчик	130
Редакційна політика та етичні норми	130
Порядок подання і оформлення статей до «Збірника наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка»	132

CONTENTS

MILITARY EQUIPMENT AND TWO-DESTINATION TECHNOLOGIES

Banzak O.V., Lienkov S.V., Sieliukov O.V., Grabovsky O.V. Modeling detector for radiation monitoring systems	7
Nazarenko A.A., Banzak G.V., Lienkov S.V., Sieliukov O.V. Development of a reliability model for a complex technical object	21
Haisha O.O., Onishchenko O.A., Haisha O.O. Modeling of the water surface under the conditions of marine waves on the base of wavelet-like functions	31
Zaitsev D. The work of the headquarters regarding the calculation of the combat capabilities of the mechanism unit and the method of determining the probability of target hit by modern means of unmanned aviation complexes	39
Mamich V.V., Maksimenko Yu.A., Didyk V.O., Sharshatkin D.Y., Dushkin Yu. G. Research of intelligence information analysis methodology	47
Mykhalenko V., D.Sci. prof. Gunchenko Yu., Leshchenko V., Zui O. Methodology for synthesizing a fuzzy adaptive control system for a complex object	54
Yakovenko V. V., Ivantsov V. P., Makalish O. V. Analysis of the influence of fragment fields radial-axial fragment-explosive projectile on the enemy's manpower	67

INFORMATION TECHNOLOGIES

Danso J.O., Druzhinin V.A. The integration of iot and mathematical models in climate change mitigation	74
Kuzavkov V.V., Ph.D. Solodovnick V.I., Lapa V.I. Integration of v-f facility in automated artillery fire control system	82
Mykhalchuk V. V., Druzhynin V. A. Suppression of cognitive biases in of a person and his intention identification task for neuro-computer systems	91
Okhramovych M.M., Gakhovych S.V., Koval M.O., Kravchenko O.I. Analysis and assessment of sensor network functioning features under jamming conditions and cyber influence	106
Trutniev S.G. Approaches to the reduction of errors in the calculation of mathematical models of combat actions in computer simulation systems	115

Data on Authors	128
Alphabetical Index	130
Editorial policy and ethical standard	130
The order of submission and registration of articles to the "Collection of scientific works of the Military Institute of the Taras Shevchenko National University of Kyiv "	132

ВІЙСЬКОВА ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ ПОДВІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

UDC 531:535

Dr. Tech. Sci., prof. **Banzak O.V.** (SUITC)
Dr. Tech. Sci., prof. **Lienkov S.V.** (VIKNU)
Dr. Tech. Sci., prof. **Sieliukov O.V.** (XGTU China)
Ph.D **Grabovsky O.V.** (SUITC)

DOI: <http://doi.org/10.17721/2519-481X/2024/84-01>

MODELING DETECTOR FOR RADIATION MONITORING SYSTEMS

The detector characteristics are determined mainly by the physical properties of the semiconductor crystal as a sensitive element of the primary converter, as well as by the features of the electrical signal registration process.

The process of registering ionizing radiation (IR) consists of converting a non-electrical quantity that characterizes it into an electrical signal. In other words, one type of energy – IR energy – is converted into another, more convenient for processing and storing information. A current or voltage pulse occurs in the radiation sensor directly as a result of ionization of its active medium – a semiconductor; this pulse carries extensive information. First of all, it is correlated with the moment in time of the nuclear process. In addition, the pulse marks the fact of radiation emission within the solid angle at which sensor is visible from source. The pulse amplitude often serves as a measure of the energy loss of radiation in sensor. The pulse shape differs for different types of radiation, as well as for different areas and angles of radiation penetration into the sensor.

Most of the information transmitted by pulses is characterized by a continuous spectrum: a pulse can appear at any time with different amplitudes. In addition, electrical signals from the detector generally arrive against a background of interference, which significantly reduces the reliability of the transmitted information. Interference can be caused by parasitic electrical signals (circuit element noise, external interference) or extraneous sources of IR. The reliability of measurements increases if the signals have qualities different from interference.

The paper proposes a structural diagram and creates a multichannel digital amplitude analyzer that provides selection of the input signal by the pulse shape at high loads, which is not available in existing devices today. The use of such an analyzer made it possible to increase the energy resolution, stability of the detector with an even greater increase in the input load of the measuring path.

Keywords: *registration of ionizing radiation, nuclear process time, continuous spectrum, energy resolution*

Introduction. Currently, almost all industries and many branches of science use IR sources. Nuclear power plants, gamma installations of various capacities, flaw detectors, counters and many other equipment are widely used in the defense industry, medicine and agriculture. However, the most important branch of IR use in Ukraine after the elimination of the combat nuclear potential is nuclear energy [1]. The country has five nuclear power plants (NPP) with two types of reactors, which generate about 40% of the country's total electricity [2].

In this regard, dosimetry problems are becoming increasingly important, which today has become an independent scientific and technical direction of nuclear physics. Dosimetry essentially solves the problems of connecting physical quantities with the expected radiation effects of IR use. The main task of dosimetry - identifying IR sources that pose a danger to the environment and humans - is today solved using a variety of technical recording means with varying degrees of efficiency. A comparative analysis of such means and methods of their application for registration and dosimetry is presented in this section [3]. In addition, the existing variety of terms and quantities in this field requires some clarification to ensure the reliability of the presented research results.

Main part

Analysis of initial parameters crystal. Semiconductor material for use in ionizing radiation sensors must meet the previously specified conditions and be characterized by a set of the following functional qualities [3].

To obtain a signal in the external electric circuit, in which the sensor is included, the charge carriers must move quickly enough in the electric field of crystal, and to obtain a signal linear in energy, its losses on the way to the electrodes must be minimal (absent). In the general case, this means that it is necessary to ensure the highest value of mobility both types of charge carriers (with their unipolar collection - mobility of electrons) and the minimum concentration of traps that capture carriers in the process of their drift to the electrodes.

To register small signals, it is necessary to have minimal loss currents at sufficiently high voltages applied to the sensor. This means that semiconductor material must be highly resistive. It must effectively absorb X-ray or gamma radiation quanta in a sufficiently small volume. Therefore, the greater the density of material and its atomic number Z , the greater absorption cross-section on an individual atom and the ability of the material to slow down ionizing radiation as a whole. This quality is fundamental for ensuring significant sensitivity of the sensor with its sufficiently small dimensions. This quality plays a particularly important role in the case of high-energy gamma-ray spectrometry, since the efficiency of recording high-energy gamma-quanta strongly depends on the thickness of sensor and the properties of active medium (cross-section of the photoelectric effect is proportional to Z^5).

In some cases, it is also important to be able to create blocking contacts that would prevent the transfer of free carriers into the working area of sensor, i.e. such contacts when the positive electrode does not inject holes into the semiconductor, and negative electrode does not inject electrons. The problem of creating blocking contacts is solved, as a rule, either by selecting appropriate metals as contact materials, or by creating n^+ - and p^+ -regions in the semiconductor by diffusion or ion doping with appropriate impurities. In this case, n^+ -contact is used as a positive electrode, and p^+ -contact as a negative one. Such structures are called pin-structures [4, 5].

The listed requirements apply both to the quality of sensor material and to its design.

The structural diagram of the semiconductor sensor and circuit diagram of secondary converter preamplifier, i.e. the entire detector, are shown in fig. 1.

To ensure the directed movement (drift) of the charge carriers created by IR, a forward bias voltage is applied to the contacts of sensor D through the load resistance R_V (fig. 1.a). The resulting pulse voltage drop $U = \frac{Q}{C}$ is in most cases not proportional to the energy lost by γ -quantum. The

difference in the charge collection time leads to a spread in the duration, and therefore in the amplitude of pulses. In addition, capacitance of the sensor itself does not remain constant. Therefore, it is necessary to use a charge-sensitive preamplifier 1 in the detector circuit (fig. 1.b).

The equivalent circuit of the semiconductor sensor contains, in addition to the diode D itself, depletion zone capacitance C_D , parasitic capacitance C_S , leakage resistance R_L and "trajectory" resistance R_S . The latter is a combination of the resistances output electrodes. The diode capacitance also depends on the voltage and quality of crystal.

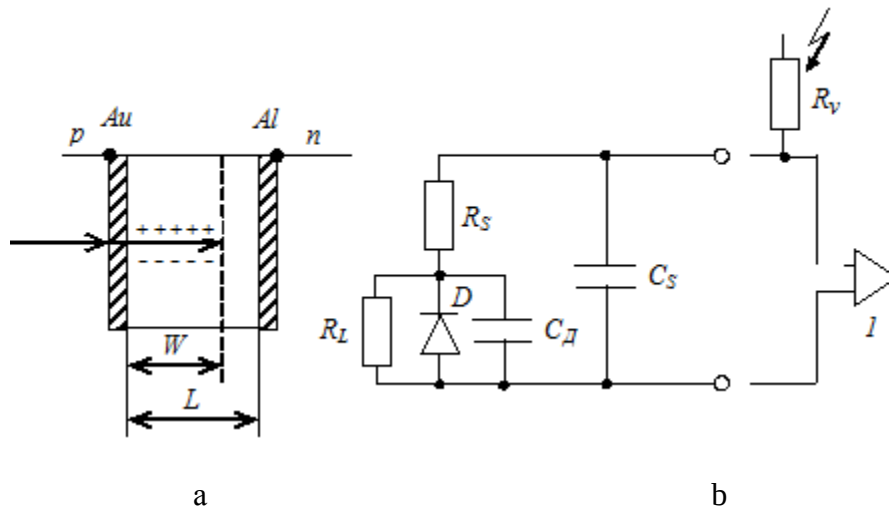


Figure 1 – Structure of the sensor (a) and equivalent circuit (b) for the semiconductor detector: designations – in the text

This dependence can be approximately represented as [6]:

$$C_d = 21 \cdot 10^3 A (\rho U_b)^{-\frac{1}{2}}, \text{ pF}, \quad (1)$$

where A – is the area of sensor, cm^2 ;

ρ – is the specific resistance of the semiconductor material;

U_b – is the blocking voltage.

The given dependence can be used for comparative evaluation of the sensor switching modes.

One of the important characteristics of the sensor is the level of parasitic components of the signal - noises not related to the physical processes of interaction of the crystal with IR. The noise level determines the minimum threshold for recording IR energy.

The conversion of the energy lost by particle in sensor into an electrical signal of the corresponding amplitude occurs with an accuracy characterized by the resolution of system[6]. The latter depends on many factors, in particular, on the properties of the amplifier. Indeed, since the amplitude of signal generated by semiconductor sensor is small, the distortion of amplitude spectrum is caused, first of all, by modulation by noise pulses arising in it and in the resistances. Chaotically adding up with useful signals, the noise "washes out" original amplitude spectrum. The distribution of noise by amplitude is Gaussian:

$$p(U) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(U_i - \bar{U})^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

where σ^2 – is the dispersion or mean square deviation of the amplitude U_i from the mean value $\bar{U}$.

Let us assume that all other factors distorting the signal amplitude spectrum are negligibly small compared to influence of noise and register monochromatic charged particles leaving all the energy in the sensor. In this case, the measured signal amplitude spectrum (fig. 2) is also determined by expression (2). However, now $\bar{U}$ – is the average signal amplitude, and σ is determined by noise, where $\sqrt{U_{uu}^2} = U_{uu}$ is equal to the root-mean-square noise voltage. The

width of the curve at half-height is called the resolution $\frac{1}{2}\Delta$ (FWHM). Substituting the value into equation (2), it is easy to obtain $p(U) = \frac{1}{2}p(\bar{U})$. Having measured the resolution in energy units (in electron volts), it is possible to determine what part of the energy corresponds to the noise level recalculated to the input of a given amplifier [7].

The absolute value of the capacitance $C_{\text{д}}$, as well as the parasitic capacitance C_s , largely determines the noise level, and with it the energy resolution of charge-sensitive preamplifier. The current flowing through leakage resistance R_L is another source of noise, which also leads to deterioration in the energy resolution.

For the subsequent devices of the detector to operate - the amplitude analyzer, discriminator, coincidence circuit - an amplifier with a high gain is required. Usually, the amplifier consists of two separate units: the preamplifier and the main amplifier. This division is due to the desire to minimize the input capacitance C , which affects the resolution, while the preamplifier is located next to the sensor. The signal, amplified by the first unit to a level at which the noise of the subsequent amplifier has practically no effect, is transmitted to the second unit via a matched cable. Particular attention should be paid to obtaining a minimum of noise in the preamplifier [8, 9].

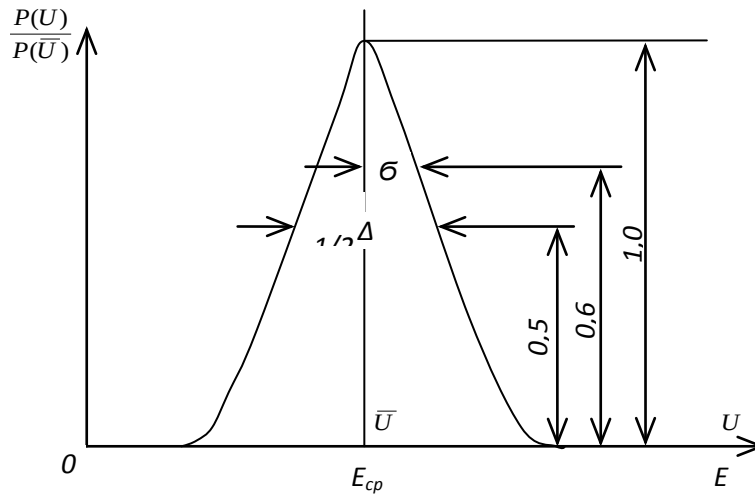


Figure 2 – Energy line expansion due to noise

To analyze the noise, let us consider in more detail the equivalent circuit of preamplifier. Noise, like the signal, can be expressed numerically in units of voltage, charge, or energy. With energy losses E , electron-hole pairs are formed $N = \frac{E}{W_p}$, giving a charge Q on the total input capacitance C . If $\tau_{\text{ex}} = RC$ is large compared to the charge collection time, then the signal amplitude $U' = \frac{Q}{C}$. For further consideration, we will take into account the action of the forming circuits. As a result of passing through the differentiating and integrating circuits with $\tau_u = \tau_d = \tau$ (this case is often used in practice), the signal will decrease by a factor of $e = 2.72$, i.e. will be $U = \frac{Q}{C \cdot e}$. Similar reasoning can be carried out for noise, only starting with voltage $U_{\text{ш}}$, then

moving on to charge $Q_u = U_u C \cdot e$, the number of charge $N_u = \frac{Q_u}{q}$ carriers, and finally to the equivalent noise energy [10]:

$$E_u = \frac{U_u C \cdot e \overline{W_p}}{q}.$$

Often, when evaluating the noise properties of amplifiers, the signal-to-noise $\eta = \frac{U}{U_u}$ ratio is used. Knowing the signal, it is easy to determine U_u and $\frac{1}{2}\Delta$.

The spectral density of the parallel noise current is:

$$\frac{i_p^{-2}}{\Delta f} = 2qI + \left(\frac{4kT}{R_p} \right), \quad (3)$$

where I – is the sum (in absolute value) of all currents acting parallel to the sensor; R_p – is the resistance of all resistors connected parallel to the sensor; Δf – is a fragment of the spectral characteristic; T – is the absolute temperature.

This spectral density can be expressed by one equivalent noise resistance R_p , the value of which is determined by the relation:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{qI}{2kT} + \frac{1}{R_s}. \quad (4)$$

Parallel noise is frequency independent, but the voltage it creates on input capacitance C , just like the input signal, depends on frequency inversely proportional to:

$$\frac{\overline{u_p}^2}{\Delta f} = 4kT \frac{1}{R_p} \frac{1}{(\omega C)^2}. \quad (5)$$

Another source of input stage noise is determined by the input amplifier device and its amplification principle. This noise does not depend on the input elements, so it is convenient to take it into account by the equivalent noise resistance R_s , connected in series with the amplifier input. For a field-effect transistor, the series equivalent noise resistance is $R_s \approx \frac{1}{S}$, where S – is the slope of the transistor's input characteristic. The intensity of the series noise is also frequency-independent and is:

$$\frac{\bar{u}_s^2}{\Delta f} = 4kTR_S \cdot \quad (6)$$

In some cases, especially when registering X-rays, the noise component of transistors of type $\frac{1}{f}$ plays a significant role. This noise can be determined by the formula:

$$\frac{\bar{u}_s^2}{\Delta f} = \frac{A_f}{f^\alpha}, \quad (7)$$

where A_f – is a constant coefficient depending on the transistor manufacturing technology $\alpha \approx 1$.

The total noise voltage of the noise sources at the amplifier input is equal to:

$$\overline{U_{uu}^2} = (4kT \frac{1}{R_p} \frac{1}{\omega^2 C^2} + 4kTR_s + \frac{A_f}{f}) \Delta f = N(\omega) \Delta f, \quad (8)$$

where $N(\omega)$ – is spectral density of input noise; Δf – is the narrow differential frequency bandwidth $f = \frac{\omega}{2\pi}$; .

The frequency response $K(\omega)$ of spectrometric amplifiers extends from low to high frequencies and the noise U_{uu} level at the amplifier output is determined by the integral expression:

$$\overline{U_{uu}^2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{+\infty} |N(\omega)| |K(\omega)|^2 d\omega. \quad (9)$$

The limiting effect of the amplifier bandwidth $K(\omega)$ also affects the signal shape. The dependence of amplifier output signal on time can be determined using the inverse Fourier transform formula:

$$S_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) K(\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

Selecting the best frequency response of spectrometric path in order to obtain the maximum signal-to-noise ratio is the essence of optimal filtering [10].

According to this theory, the square of the maximum possible signal-to-noise ratio is equal to [11]:

$$(\eta_{max}^\infty)^2 = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{U^2(\omega)}{U_{uu}^2(\omega)} d\omega,$$

where $U(\omega)$ and $U_{uu}(\omega)$ – are the spectrum of the signal and noise at the amplifier input, respectively.

It has been theoretically shown that the maximum signal-to-noise ratio in this case is achieved with equal integration and differentiation $\tau_{CR}=\tau_{RC}=\tau$ time constants. In this case, the noise level is minimal at some optimal time constant τ_0 :

$$\tau_0 = C\sqrt{R_S R_P} . \quad (10)$$

Then noise level at the amplifier output is determined by integral expression:

$$\overline{U_{ш}^2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty N(\omega) \frac{\omega^2 \tau^2}{(1 + \omega^2 \tau^2)^2} d\omega = 4kT \frac{R_S}{8\tau} + \frac{4kT\tau}{8C^2 R_P} + \frac{A_f}{2} . \quad (11)$$

As can be seen from (11), serial noise depends inversely, parallel noise – proportionally, and noise of type $\frac{1}{f}$ does not depend at all on τ . The minimum noise $\tau=\tau_0$ value at is equal to $\overline{U_{ш.мин}^2} = \frac{kT}{C} \sqrt{\frac{R_S}{R_P}}$ (excluding noise of type $\frac{1}{f}$). Considering that with CR-RC formation the amplitude of the output signal does not depend on τ , the minimum noise corresponds to the maximum signal-to-noise ratio:

$$\eta_{\max}^{RC} = \frac{S_{2\max}}{U_{ш.мин}} = \left(\frac{2}{e}\right) \frac{Q}{\sqrt{4kTC}} \sqrt{\frac{R_P}{R_S}} = \left(\frac{2}{e}\right) \eta_\infty . \quad (12)$$

This formula shows the ratio of output voltage amplitude to root-mean-square voltage of the output noise. The input signal of the spectrometric amplifier is a charge Q or energy E released by ionizing radiation in the sensor, so in practice it is common to express noise level also in units of charge or energy. Taking $\eta_{\max}^{RC}=1$, we find the equivalent root-mean-square noise charge for CR-RC formation:

$$\sigma_q^{RC} = \left(\frac{e}{2}\right) \sqrt{4kTC} \sqrt{\frac{R_S}{R_P}} = 1,36\sigma_q , \quad (13)$$

where σ_q is the minimum possible noise charge.

The presented model of the primary converter allows, taking into account the real properties of the crystal, to calculate the dependences of the energy equivalent noise on the time constant of the input stage of the preamplifier (fig. 3).

When designing the analyzer, a comparison was made of two methods for determining the amplitude, differing in resolution and computational costs: first is determining difference between local minima and subsequent maximum; the second is determining difference between successive maxima.

Figure 3 shows an out-of-scale image of a typical segment of the preamplifier output signal, containing two pulses [12, 13]. The duration of the leading edge of individual pulse is – $\Delta t = 20$ ns, constant of the trailing edge is – $\alpha = 2020$ μ s. The amplitude is expressed in ADC discretes. The simplest first method for determining the pulse amplitude in such an input sequence is finding the difference between the local minimum and the subsequent local maximum. Let us introduce the

following notations for the input signal: $f_1(t)$ – function describing the decay of the first pulse;
 $f_2(t)$ – function describing the decay of the second pulse.

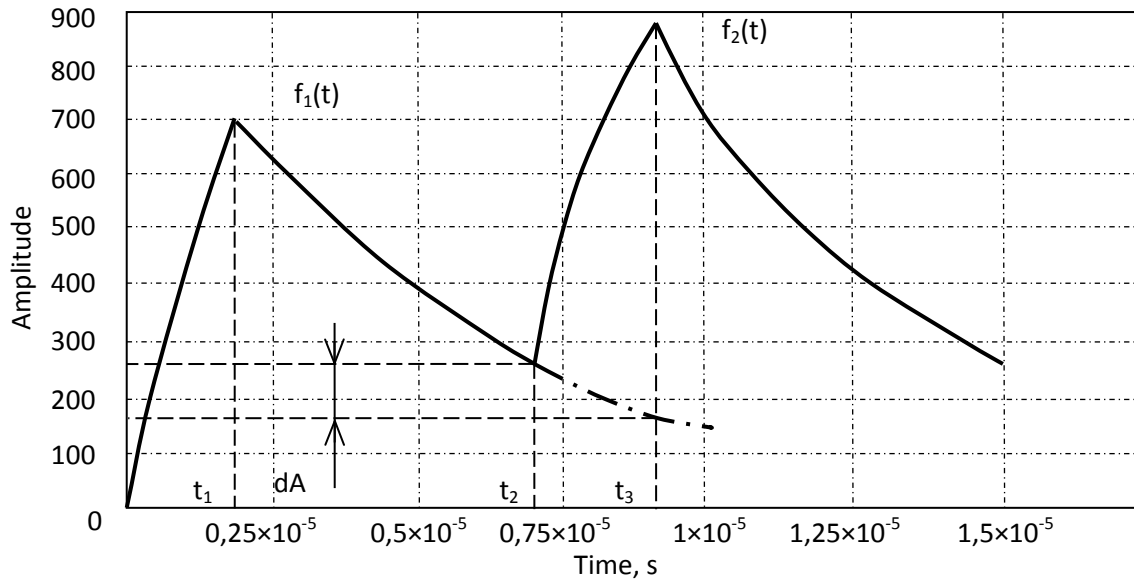


Figure 3 – Analysis of structure typical fragment input pulses of preamplifier
Then, according to the first method, the amplitude of the second pulse is found as:

$$A^* = f_2(t_3) - f_1(t_2), \quad (14)$$

where t_3 and t_2 – are the moments of time indicated in figure 3.

True pulse amplitude:

$$A = f_2(t_3) - f_1(t_3). \quad (15)$$

Hence, the error in determining amplitude is:

$$dA = A - A^* = f_1(t_2) - f_1(t_3). \quad (16)$$

Since the pulse decay constant is determined by the physical characteristics of the sensor and preamplifier, it has a constant value for all input pulses [13]. Then absolute value of the input signal at a given time t_1 can be expressed as follows:

$$f_1(t_1) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{-\alpha \tau_n}, \quad (17)$$

Similarly for the moments of time:

$$f_1(t_2) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{-\alpha(\tau_n + \delta t)} = e^{-\alpha \delta t} \cdot f_1(t_1), \quad (18)$$

$$f_1(t_3) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{-\alpha(\tau_n + T)} = e^{-\alpha T} \cdot f_1(t_1), \quad (19)$$

where $\delta t = t_2 - t_1$, $T = t_3 - t_1$.

Substituting (18) and (19) into (16), we obtain:

$$dA = f_1(t_1) \left(e^{-\alpha \delta t} - e^{-\alpha T} \right). \quad (20)$$

Because

$$\delta t = (t_3 - t_1) - (t_3 - t_2) = T - \Delta t, \quad (21)$$

where $\Delta t = t_3 - t_2$ – is the duration of the leading edge, then:

$$dA = f_1(t_1) \cdot e^{-\alpha T} \cdot (e^{-\alpha \Delta t} - 1). \quad (22)$$

From expression (22) it is evident that the error in determining the amplitude using the first method depends on last maximum of the signal $f_1(t_1)$ (sum of amplitude last pulse and the dips from previous pulses), the time between the last and determined pulses T and the duration of the leading edge of determined pulse Δt [14, 15]:

$$dA = \Phi(f_1(t_1), T, \Delta t). \quad (23)$$

For a qualitative analysis of the obtained dependence on the spectrometer load value (the number of pulses recorded in 1 s), we will assume that pulses of the same amplitude A are received at the input. Then the mathematical expectation at ADC input:

$$M_{amnl} = \sum_{n=0}^{\infty} A \cdot e^{-\alpha T} M^n = \frac{A}{1 - e^{-\alpha T_M}}, \quad (24)$$

where T_M – mathematical expectation of the pulse repetition period; $T_M = 1/F_3$, where F_3 – loading frequency.

Substituting (23) into (21), we obtain:

$$dA_M = A \frac{e^{\alpha \Delta t} - 1}{e^{\alpha T_M} - 1}.$$

Figure 4 shows a graph of the dependence mathematical expectation error on the loading frequency for $A=700$, $\Delta t = 20 \cdot 10^{-9}$ s, $\alpha = 20 \cdot 10^{-6}$ s. It is evident from the graph that the magnitude of the error at a loading frequency of about 10^6 c⁻¹ can reach 1-2%.

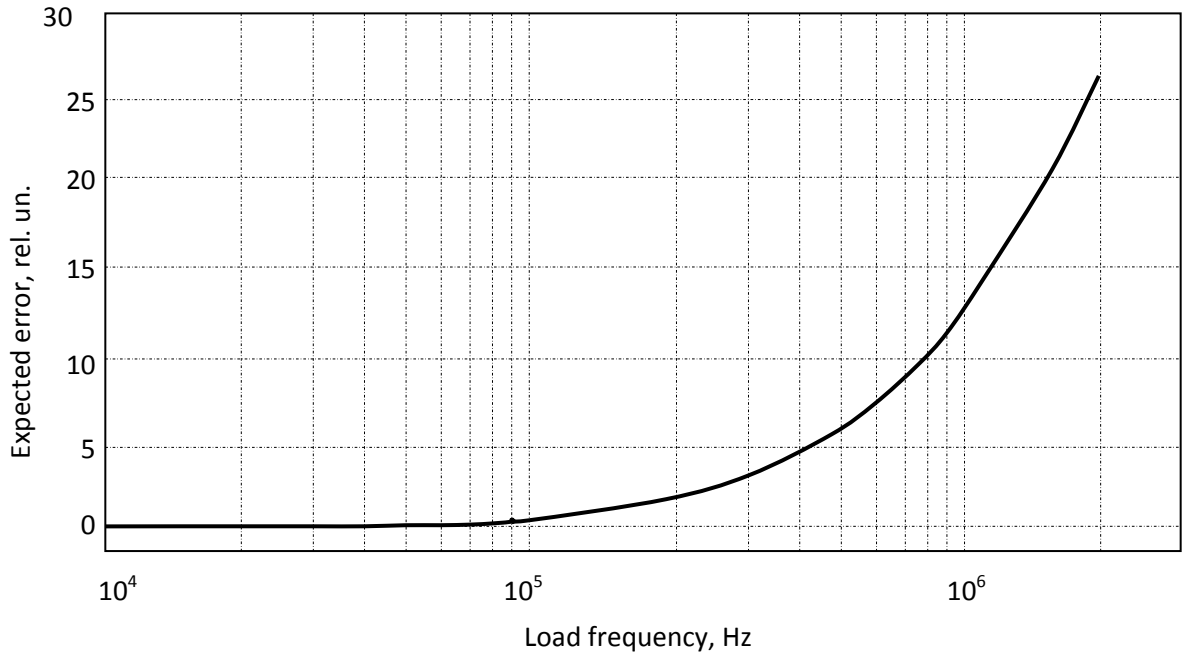


Figure 4 – Dependence of the expected error on the loading frequency when determining the pulse amplitude by directly measuring it between minimums and maximums

This error can be avoided if we assume that the coefficient depends on the sensor and preamplifier, i.e. is a constant value for a specific spectrometer and can be determined empirically. In particular, using the notations in figure 4, we obtain:

$$\alpha = \frac{\ln(f_1(t_1)) - \ln(f_1(t_2))}{\delta t}. \quad (25)$$

Then the formula for the second method of determining the amplitude takes the following form:

$$A = f_2(t_3) - e^{-\alpha T} f_1(t_1). \quad (26)$$

The price paid for increasing the accuracy in this method is an increase in the volume of calculations. This should be taken into account when constructing spectrometers operating in real time.

Mathematical expectation of the amplitude maximum sample:

$$M_s = A - \frac{\Delta}{2} = A \frac{1 + e^{-\alpha t}}{2}. \quad (28)$$

The variance of the error in amplitude will be:

$$D_s = \frac{\Delta^2}{12} = \frac{A^2}{12} (1 - e^{-\alpha t})^2. \quad (29)$$

The dependence of the maximum sample amplitude on the sampling frequency is shown in figure 5, where for definiteness the true amplitude input pulses is taken to be equal to 700 ADC quantization levels. The graph of the mathematical expectation of the maximum sample amplitude shows the location of the peak on energy spectrum. With an increase in the sampling frequency from 10 to 100 MHz, the magnitude of peak decrease from the true value (700) decreases from 1% to 0.1%. The deviation limits characterize the peak width in spectrum, which affects the resolving properties of spectrometer.

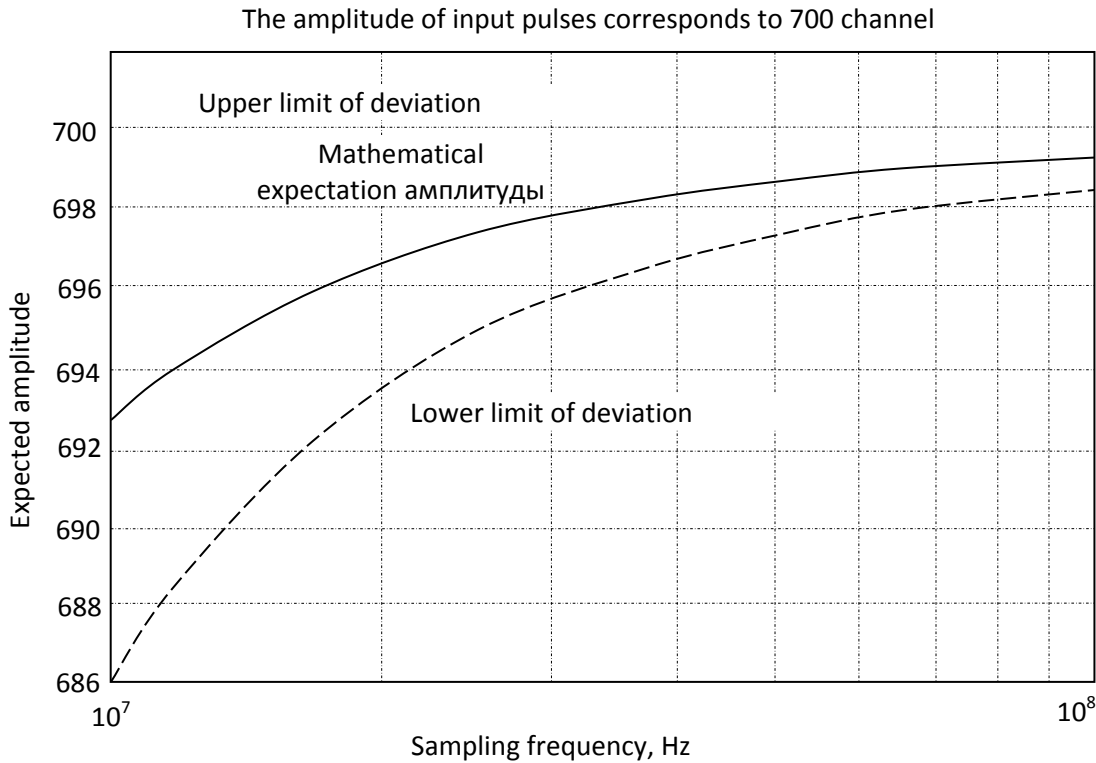


Figure 5 – Dependence of sampling error on its frequency

For a more complete comparison of the resolution methods described above, the process of measuring pulse amplitude was simulated based on the model developed above [12,13].

At same time, the use of digital signal processing technique proposed in this work allows both methods to obtain an energy resolution not exceeding 40 keV. This is sufficient to create a dosimeter with compensation of the energy dependence sensitivity (EDS). In addition, these results show that second method is optimal for creating high-resolution spectrometers - less than 10 keV.

Thus, a comparison of the two methods for determining the amplitude showed that at a low loading frequency ($<10^5 \text{ s}^{-1}$), first method is preferable: it is characterized by a smaller volume of calculations with the same accuracy characteristics. At high loading frequencies (about 10^6 s^{-1} and more), preference should be given to the second method, which retains its accuracy and resolution.

Thus, the obtained model allows us to estimate the effect of sampling frequency on the magnitude of shift peaks of the energy spectrum and resolution properties of the spectrometer when choosing parameters of its hardware implementation.

Therefore, for the effective use of ADC bit depth, the constant component must be subtracted from its input signal. The dynamic range of signal change must be matched with the diagnostic range of ADC. To solve this problem, a corresponding circuit of the digital spectrometer is proposed, shown in fig. 6.

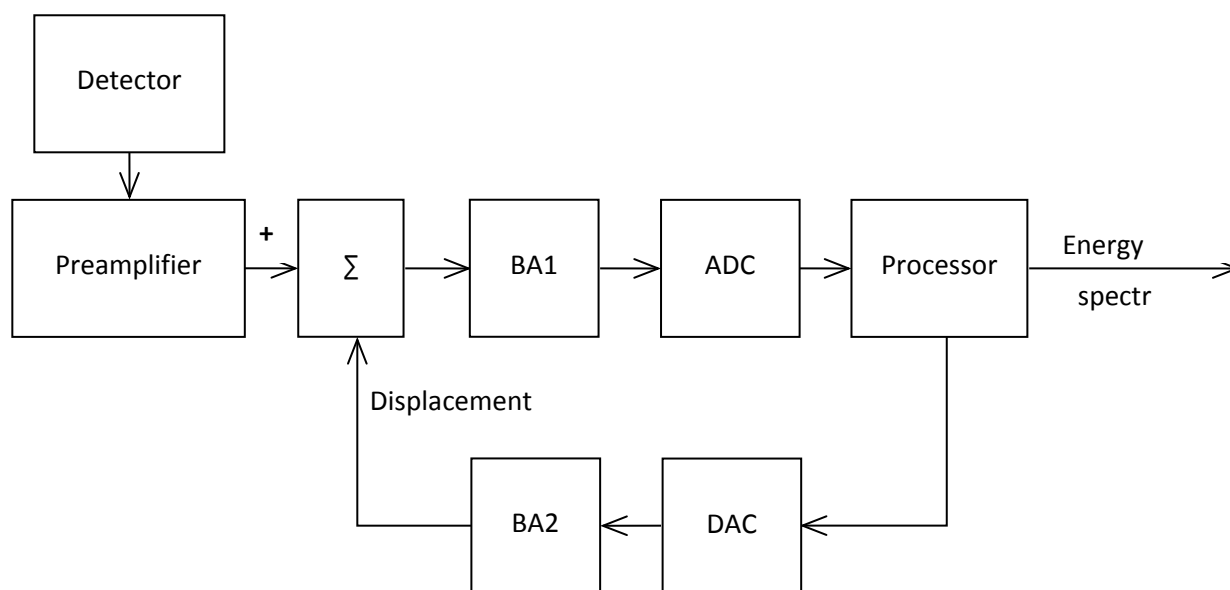


Figure 6 – Block diagram of digital spectrometer: Σ – adder; BA – buffer amplifier; DAC – digital-to-analog converter

In this diagram, the processor, based on the analysis of signals from ADC, sets the required gain factors of the first buffer amplifier and offsets for adder.

The maximum gain factor in BA1 is selected so that when measuring the minimum background, the signal at ADC input corresponds to its dynamic range. The minimum value of the gain factor should match the input signal with the dynamic range of ADC at the maximum frequency of loading pulses maximum possible amplitude and zero offset value.

For example, in order to improve the energy resolution, the sensor uses such a feature of CdZnTe as a large difference in the mobility of electrons and holes. Thus, the use of digital signal processing allows us to achieve a result similar to changing the configuration of the electrodes. This allows us to create dosimeters that solve an important practical problem – compensation for the energy dependence of sensitivity.

Conclusions. The paper presents a model of primary transducer – gamma-radiation sensor. It is based on the following properties of a semiconductor crystal: maximum quantum efficiency; maximum carrier mobility; minimum density of structural defects; maximum values of specific resistance and density. The combination of these properties provides significant sensitivity of the sensor with minimum crystal dimensions. The inconsistency of such a combination must be eliminated both in the process of crystal manufacturing (for example, a high-resistance crystal can be obtained by simultaneously using cleaning, components and compensating doping) and by subsequent processing using the methods proposed in this paper (thermal field method, ionization annealing).

The model of the primary transducer (sensor) allows calculating dependence of the energy equivalent of noise on the properties input stage of preamplifier, taking into account the real properties of the crystal. It is shown that:

- increase in the crystal volume, bias voltage and sensor capacitance increases the noise level;
- results of the analysis in relation to CdZnTe crystals used in this work indicate the possibility of sensor operating without cooling.

REFERENCES:

- 1 Vavilov V.S. Effect of radiation on semiconductors / V.S. Vavilov, N.P. Kekelidze, L.S. Smirnov. - Moscow: Nauka, 1988. - 192 p.
- 2 Lenkov S.V. Physical and technical foundations of radiation technology of semiconductors / S.V. Lenkov, V.A. Mokritsky, D.A. Peregudov, G.T. Tarielashvili. - Monograph. - Odessa: Astroprint, 2002. - 297 p.
- 3 Garkavenko A.S. Radiation modification of the physical properties of wide-gap semiconductors and the creation of high-power lasers on their basis / Lvov: ZUKTs, 2012. - 258 p.
- 4 Banzak O.V. New generation semiconductor detectors for radiation monitoring and dosimetry of ionizing radiation / O.V. Banzak, O.V. Maslov, V.A. Mokritsky: Ed. V.A. Mokritsky, O.V. Maslov. - Monograph. - Odessa, 2013. - Publishing house "VMV". - 220 p.
- 5 Bouchet J.M. PWR primary flow measurements by correlation analysis of nitrogen-16 fluctuations / J.M. Bouchet, et al. - Progress in Nuclear Energy. - 1982. - Vol. 9.
- 6 Awadalla S.A. Characterization of detector-grade CdZnTe crystals grown by traveling heater method (THM) / S.A. Awadalla, J. Mackenzie, H. Chen, eds. // Journal of Crystal Growth. - Vol. 312, issue 4. - 2010. - 507-513c.
- 7 Grybos P. Front-end Electronics for Multichannel Semiconductor Detector Systems; EuCARD Editorial Series on Accelerator Science and Technology, Vol.08 / Institute of Electronic Systems Warsaw University of Technology. - Warsaw: 2010. - 201 p.
- 8 Dumitrescu A. Comparison of a digital and an analogical gamma spectrometer at low count rates / A. Dumitrescu // U.P.B. Sci. Bull., Series A. - Vol. 73. - Iss. 4, 2011. - P. 127-138.
- 9 Maslov O. Passive Computer Gamma- Tomography of Nuclear Fuel / O. Maslov, V. Mokritsky, O. Banzak, // ANIMMA. Third International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications - Marseille, June 23-27, 2013. - Book of Abstracts - P. 51.
- 10 Maslov O.V. The Improved CdZnTe Dose Rate Probe / O.V. Maslov, M.V. Maksimov, L.L. Kalnev // 2008 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and 16th Room Temperature Semiconductor Detector Workshop - Dresden: 19-25 Oct. 2008. - P. 12-87.
- 11 Maslov O. Multiple energies passive computer tomography of nuclear fuel / O. Maslov // Proceedings of the International Ukrainian-Japanese Conference on Scientific and Industrial Cooperation - Odesa 24 - 25 October 2013. - P. 114-116.
- 12 Masuruk K. Dopant incorporation during liquid phase epitaxy / K. Masuruk, T. Bryskewicz // J. Appl. Phys., 1981. - V. 52. - N3. - part 1. - P. 1347-1350.
- 13 Banzak O.V. Optimum operating mode of cdznte-sensors in the gamma radiation dosimeter / O.V. Banzak, H.V. Banzak, A.A. Gaber // Sur les matériaux de la v conférence scientifique et pratique internationale «Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique» - Paris 21-23 June 2023. - P. 77 - 79.
- 14 Banzak O.V. Methods and means of control of nuclear materials and status of protective barriers at npp in wartime conditions / O.V. Banzak, S.V., Lienkov, O.V. Sieliukov, A.A. Gaber // Collection of scientific papers of the Military Institute of Taras Shevchenko national university of Kyiv. . - K., 2024. - № 83. - C. 7 - 17.
- 15
15 Model of physical processes in the primary and secondary converters of the detector for radiation monitoring systems / Lienkov S.V., Banzak O.V., Sieliukov O.V., Zharebtsova L.N. // Collection of scientific papers of the Military Institute of Taras Shevchenko national university of Kyiv. . - K., 2023. - № 81. - C. 16 - 25.

МОДЕЛЮВАННЯ ДЕТЕКТОРА ДЛЯ СИСТЕМ РАДІАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ

Характеристики детектора визначаються головним чином фізичними властивостями кристала напівпровідника як чутливого елемента первинного перетворювача, а також особливостями процесу реєстрації електричного сигналу.

Процес реєстрації іонізуючого випромінювання (ІВ) полягає у перетворенні неелектричної величини, що характеризує його, електричний сигнал. Інакше висловлюючись, у своїй перетворюється один вид енергії – енергія ІВ – в інший, зручніший для обробки та накопичення інформації. У датчику випромінювання виникає імпульс струму чи напруги у результаті іонізації його активного середовища – напівпровідника, цей імпульс несе велику інформацію. Насамперед, він корелюється з моментом часу ядерного процесу. Крім того, імпульс наголошує на факті випромінювання радіації в межах тілесного кута, під яким датчик видно від джерела. Амплітуда імпульсу часто є мірою енергетичних втрат випромінювання в датчику. Форма імпульсу відрізняється для різних видів випромінювання, а також для різних областей та кутів попадання випромінювання в датчик.

Більшість інформації, передана імпульсами, характеризується безперервним спектром: імпульс може виникнути у час з різною амплітудою. Крім того, електричні сигнали з детектора в загальному випадку надходять на тлі перешкод, що значно знижують достовірність інформації, що передається. Перешкоди можуть бути спричинені паразитними електричними сигналами (шуми елементів схеми, зовнішні наведення) або сторонніми джерелами ІВ. Надійність вимірювань збільшується, якщо сигнали мають властивості, відмінні від перешкоди.

У роботі запропоновано структурну схему та створено багатоканальний цифровий амплітудний аналізатор, що забезпечує селекцію вхідного сигналу за формою імпульсу при великих завантаженнях, що недоступно приладам, що існують. Застосування такого аналізатора дозволило збільшити енергетичну роздільну здатність, стабільність роботи детектора при ще більшому збільшенні вхідного завантаження вимірювального тракту.

Ключові слова: реєстрація іонізуючого випромінювання, час ядерного процесу, безперервний спектр, енергетичний дозвіл

Ph.D Nazarenko A.A. (SUIC)

Ph.D Banzak G.V. (SUIC)

Dr. Tech. Sci., prof. Lienkov S.V. (VIKNU)

Dr. Tech. Sci., prof. Sieliukov O.V. (XGTU China)

DOI: <http://doi.org/10.17721/2519-481X/2024/84-02>

DEVELOPMENT OF A RELIABILITY MODEL FOR A COMPLEX TECHNICAL OBJECT

Complex technical objects today are of exceptional importance in modern society. First of all, we are talking about various military and special-purpose radio-electronic systems, radar stations, automated control systems (air traffic, energy facilities, etc.). The level of reliability such objects determines the defense capability of the state, economic security, and the lives of hundreds and thousands of people.

Such objects belong to the class of long-term, reusable, and refurbished objects. They are usually expensive and require significant costs for their operation. To ensure the required level of reliability during their operation, maintenance (MC) is usually carried out, the essence of which is the timely preventive replacement of elements that are in a pre-failure state.

A characteristic feature of complex technical objects for special purposes is the presence in their composition of a large number (tens, hundreds of thousands) of different types of components that have different levels of reliability, different patterns of their wear and aging processes. This feature requires a more subtle approach to the organization and planning of MC during their operation. The DN-distribution is used as a failure model for all elements and the object as a whole. The DN-distribution is considered to be an adequate model of gradual failures both for electronic products and for various mechanical units and elements. An important advantage of DN-distribution is that its appearance is preserved when transforming the reliability structure of the system. It is this feature of DN-distribution that made it possible to apply it to a system with a hierarchical structure.

The failure-free operation model (FM) allows obtaining estimates of the failure-free operation indicators (FMI) of individual structural elements and the object as a whole based on the FMI information of the elements lower structural level. FM represents hierarchical structural structure of the object. Structural elements of a certain u -th structural level are a sequential (in terms of reliability) connection of the elements of $(u+1)$ -th level included in it. Individual structural elements can represent a redundant group (parallel connection) of similar elements.

Keywords: *complex technical objects, automated control systems, objects that are restored*

Introduction. Complex technical objects of military equipment are of exceptional importance in modern society. This primarily concerns various military and special-purpose radio-electronic systems, radar stations, automated control systems (air traffic, energy facilities, etc.). The level of reliability of such objects determines the defense capability of the state, economic security, and the lives of hundreds and thousands of people. Complex technical objects are understood to be objects consisting of a large number of different types of elements (tens, hundreds of thousands), each of which can be a fairly complex technical device. Elements can be electronic, mechanical, electromechanical, hydraulic, etc. The heterogeneity of elements leads to the fact that different elements are characterized by fundamentally different physical processes (and, consequently, rates) of degradation, leading to their failures. Objects can have an arbitrary reliability structure (usually series-parallel). The structural structure of such objects is usually hierarchical, that is, the object consists of subsystems, subsystems consist of units (cabinets), units consist of devices (blocks), etc.

Analysis of previous studies. The “surge” in the number of theoretical works on the issues of maintenance complex systems occurred in the 70-s of the last century, which can be explained by the mass production of complex military and special-purpose electronic equipment at that time [1-6]. Currently, there is a decline in the number of scientific publications devoted to the issues

maintenance of complex technical objects. One of the reasons for this, in our opinion, is a sharp increase in the level of integration and reliability of component parts. Due to this, developers of complex equipment were able to solve the issues of ensuring required level of failure-free operation without significant costs for maintenance (or without maintenance at all). However, the same reason (high integration and reliability of component parts) opened up the possibility of implementing increasingly complex equipment with new functions, which was impossible with the old element base. This again objectively leads to problems of ensuring reliability and, therefore, the question of need for maintenance and the choice of optimal strategy for its implementation again becomes relevant.

Main part

Model of failure-free operation of a non-repairable object. The developed model is intended to obtain the probability functions of failure-free operation $P(t)$ (or the distribution function of the time to failure $F(t)=1-P(t)$) for the object as a whole and all its structural elements based on the available information on the failure-free performance of the component elements. The functions $P(t)$ and $F(t)$ are the failure-free performance indicators of non-recoverable objects, therefore we will call the model a failure-free model (FM) of a non-recoverable object.

The structural structure of a complex technical object is almost always hierarchical. Elements related to different structural levels can be called, for example, units (cabinets), devices (blocks), nodes (boards), etc. In this case, the object can consist of units, units - of devices, devices - of nodes, etc.

Let us designate E_{ijk}^u k -th element of u -th structural level, which is part of j -th element ($u-1$)-th level. In this case, index ijk indicates chain of numbers of elements higher levels (including this one) in the sequence of their inclusion in the elements of the previous (higher) levels. The numbering of levels starts from the top, starting with the object level ($u=0$). The numbering of the u -th level elements included in ($u-1$)-th level element is independent within this element. Thus, the number of numbers in the lower index is always equal to value of the upper index u – number of design level.

The object as a whole is considered as a zero-level element E^0 . It is always unique and is not included in any other elements. Fig. 1 shows a fragment of the hierarchical design structure of the object.

Each design element of a certain u -th level E_{ijk}^u can include design elements of the next ($u+1$)-th level. In fig. 1, the lower-level elements are designated by circles, all other elements – by rectangles.

The term design element will be used when it is necessary to pay attention to the place occupied in the design structure of the object. Following the terminology adopted in [3, 8], we will agree to call the design elements of the lower level zero-rank products (ZRP). ZRP can be either a very complex device or consist of a single simple element (for example, a resistor, microcircuit, transformer, bearing, etc.). ZRP is a non-separable element and is always considered as a single whole.

We will formally represent the design structure of the object as a hierarchical list structure. Each design element $E_{ij...r}^u$ is considered as a list

$$E_{ij...r}^u = \{E_{ij...r0}^{u+1}, E_{ij...r1}^{u+1}, ..., E_{ij...rs}^{u+1}, ... \}; \quad s = \overline{0, |E_{ij...r}^u|}; \quad u = \overline{0, U}, \quad (1)$$

where $E_{ij...rs}^{u+1}$ – is the element of ($u+1$)-th level, which is part of element $E_{ij...r}^u$;
 U – is the maximum level (nesting) of structural elements for a given RET object.

The object as a whole is represented by a list of 1-st level elements:

$$E^0 = \{E_0^1, E_1^1, \dots, E_i^1, \dots\}; \quad i = \overline{0, |E^0|}. \quad (2)$$

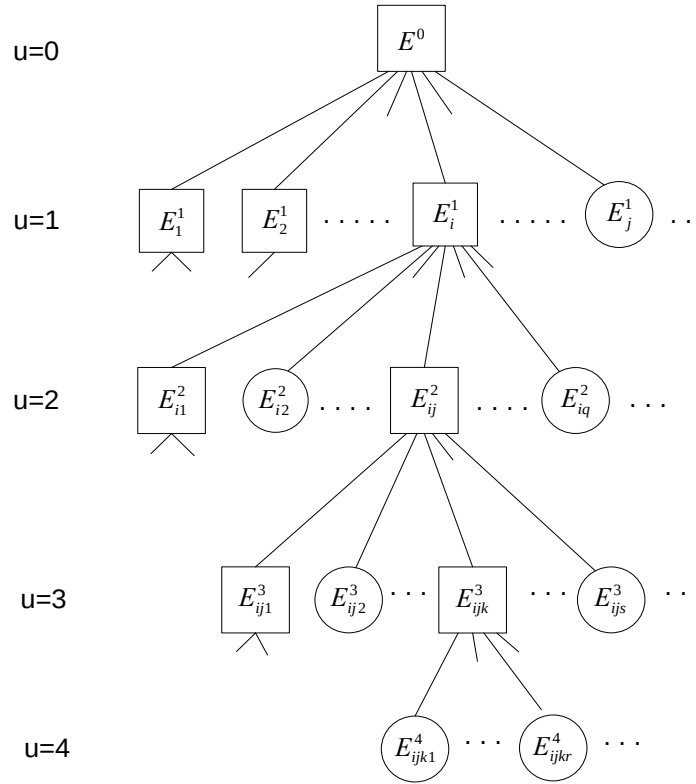


Figure 1 – Fragment of the hierarchical structural structure of the object

ZRP elements are represented by empty lists.

The set of all nested lists of the form (1) is a mathematical model of the structural structure of the object.

The reliability structure of the object can be an arbitrary series-parallel structure. This means that each structural element $E_{ij\dots k}^u$ can be either an ZRP element, or a series connection of its constituent elements, or a redundant group of elements – a group of elements connected in terms of reliability in parallel. Only elements of the same type can be elements of a redundant group. Redundancy in groups can be loaded (permanent) or unloaded (substitute).

If an element $E_{ij\dots k}^u$ consists of series-connected elements of $(u+1)$ -th level, then the probability of failure-free operation of this element is determined as the product:

$$P(t / E_{ij\dots k}^u) = \prod_{\forall E_{ij\dots kr}^{u+1} \in E_{ij\dots k}^u} P(t / E_{ij\dots kr}^{u+1}), \quad (3)$$

where r - number of element of the $(u+1)$ -th level $E_{ij\dots kr}^{u+1}$, which is part of the element of u -th level $E_{ij\dots k}^u$;

$P(t / E_{ij\dots kr}^{u+1})$ - probability failure-free operation of an element $E_{ij\dots kr}^{u+1}$.

If an element $E_{ij...k}^u$ is a redundant group consisting of n identical elements connected in parallel $E_{ij...k0}^{u+1}$, then in the case of a permanent reserve the probability of failure-free operation for it is equal to [1, 2]:

$$P(t / E_{ij...k}^u) = 1 - [1 - P(t / E_{ij...k0}^{u+1})]^n. \quad (4)$$

The model does not take into account the possibility of multiple failures, since within the framework of the tasks for which this model is being developed, the probability of multiple failures can be neglected.

From the above, it is clear that the initial information for the model should be the probability functions of failure-free operation of ZRP $P(t / e_m)$ (e_m - designation of an arbitrary ZRP). For all structural elements of higher levels, including the object as a whole, functions $P(t / E_{ij...r}^u)$ must be calculated.

In practice, functions $P(t / e_m)$ are rarely known exactly. In the best case, the first two moments are known and there are certain assumptions about the class of distribution laws to which the function $P(t / e_m)$ possibly belongs. As a rule, only the estimate of the first moment (the mathematical expectation of the time to failure) is known. In the worst case, neither the distribution function nor its moments are known. Therefore, in practice, it is necessary to make an assumption about the type of distribution law taking into account the type of a given element and the available information about the physical laws of failure for elements of this type. The estimate of the average time to failure of elements has to be specified based on information about analogous elements. The developed model is intended to solve the problems of assessing the reliability of aging objects, so we need to use the laws of distribution of the time to failure, taking into account the degradation processes in the materials of different types of elements. Failures caused by various degradation processes are usually called gradual [3-5]. At present, it has become generally accepted that gradual failures occur due to the fact that the value of some determining parameter reaches the maximum permissible value. Failure models based on the concept of the determining parameter are usually called probabilistic-physical (VF-models) [6-8].

The most universal model of gradual failures is the diffusion non-monotonic distribution (DN-distribution) [9].

For DN-distribution, the probability density has the following form:

$$f(t) = f(t; \mu, \nu) = \frac{\sqrt{\mu}}{\nu t \sqrt{2\pi t}} \exp\left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\nu^2 \mu t}\right), \quad (5)$$

where μ - is the scale parameter (mean time to failure);

is ν - variation coefficient.

The density function (5) corresponds to the integral function of DN-distribution:

$$\begin{aligned} F(t) = DN(t; \mu, \nu) &= \Phi\left(\frac{t - \mu}{\nu \sqrt{\mu t}}\right) + \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right) \Phi\left(-\frac{t + \mu}{\nu \sqrt{\mu t}}\right) = \\ &= \Phi\left(\frac{at - 1}{\nu \sqrt{at}}\right) + \exp\left(\frac{2}{\nu^2}\right) \Phi\left(-\frac{at + 1}{\nu \sqrt{at}}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

where $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$ - normalized distribution;

a - the average rate of degradation process (average rate of change determining parameter), equal to $a = 1/\mu$.

The *DN*-distribution has one important property, which is that the variation coefficient of the time-to-failure distribution coincides with the variation coefficient of the distribution of the random variable of the determining parameter. This property, combined with the fact that the average time-to-failure is equal to the inverse of the average degradation rate of the determining parameter, opens up great possibilities for using the *DN*-distribution in maintenance modeling problems.

The versatility of the *DN*-distribution is that its variation coefficient (shape parameter) practically coincides with the shape parameters of the *DN*-distribution and is approximately equal to the inverse value of shape parameter of the Weibull distribution and alpha distribution [6]. This allows using the *DN*-distribution as a model of failures of elements of various types with different physical mechanisms of degradation processes. To ensure the adequacy of the failure model, it is sufficient to correctly set the value of the variation coefficient. Recommendations for choosing the variation coefficient are given in [8]. Table 1 contains some data on the characteristic values of the variation coefficient taken from.

Table 1

Generalized estimates of coefficients variation of various physical processes

Type of degradation process	Coefficient of variation of the destruction process	Name of elements subject to destruction
Fatigue (multi-cycle)	0,40 – 1,00	Housing parts, rolling bearings, shafts, axles, springs, connecting rods, bolts, etc.
Wear (mechanical-chemical)	0,20 – 0,50	Housing parts, rolling bearings, shafts, axles, springs, connecting rods, bolts, etc.
Aging	0,40 – 1,00	Plain bearings, shafts, axles, guides, bushings, etc.
Electrical (electrolysis, charge migration, electrodiffusion)	0,70 – 1,50	Semiconductor devices, integrated circuits, capacitors and other electronic products.

The selection of the numerical value of the variation coefficient from the specified range in each specific case can be carried out taking into account the following general considerations: the higher the average ratio of the load to the fatigue limit (strength), the lower the variation coefficient, and vice versa, that is, the lower the loading coefficient, the higher the variation coefficient.

Taking into account all of the above, we select *VF*-model of *DN*-distribution as a failure model for all structural elements and the object as a whole. The initial information for MC in this case is a set of pairs of parameters of all ZRP elements. Based on this information, the corresponding parameters $\langle \mu_i, \nu_i \rangle$ for all other structural elements of higher levels should be calculated.

In [10], it is proved that if a system consists of elements whose failures are subject to *DN*-distribution, then failures of the system are also subject to *DN*-distribution. The parameters of the *DN*-distribution of the operating time to failure of the system (the scale parameter and the shape parameter) depending on the method of reliable connection of the elements in the system are

calculated using the following formulas. Calculation formulas for determining the scale parameter and shape parameter for structural elements of higher levels (not ZRP):

Sequential connection of different types of elements:

$$\mu = 1 / \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{n_i}{\mu_i^2}}; \quad (7)$$

$$\nu = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{n_i \nu_i^2}{\mu_i^2}} / \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{n_i}{\mu_i^2}} \quad (8)$$

where n_i - is the number of elements of the i -th type;

μ_i - is the scale parameter of DN -distribution of the time to failure of elements of the i -th type (average time to failure of elements of i -th type);

ν_i - is the shape parameter of DN -distribution of the time to failure of elements of i -th type (variation coefficient);

N - is the number of element types in the system.

Series connection of identical elements:

$$\mu = \mu_0 / \sqrt{n}; \quad (9)$$

$$\nu = \nu_0, \quad (10)$$

where μ_0 - is the scale parameter of DN -distribution of elements included in the system (mean time to failure of one element);

n - is the number of identical elements in the system.

Loaded (constant) redundancy:

$$\mu = \mu_0 \sqrt{n}; \quad (11)$$

$$\nu = \nu_0 / \sqrt{n}. \quad (12)$$

Unloaded (replacement) redundancy:

$$\mu = \mu_0 n; \quad (13)$$

$$\nu = \nu_0 / \sqrt{n}. \quad (14)$$

The formal descriptions of the constructive and reliability structures of the object introduced above, the expression for the probability of failure of the object (or element) $F(t)$ (6) and the calculation expressions (7)-(14) together represent a mathematical model of the failure-free operation of a non-recoverable object.

The prototype of the considered MC can be considered the model described in [12]. The main difference between the MC and the prototype is the use of an important property of DN -distribution

to preserve the type of distribution when transforming the reliability structure of the structural elements (when switching from a sequential structure to a parallel one, and vice versa).

Model of failure-free operation of a recoverable object. In the above, a MC was developed for the case when the object is considered non-recoverable. In the developed model

- (a) hierarchical structural structure of the object is presented;
- (b) reliability structure is determined by specifying a redundant group attribute for each structural element;
- (c) automatic (software) calculation of the parameters of the *DN*-distribution of the time to failure for each of the elements of the object is performed.

Thus, MC contains all the information necessary for modeling failures of any of the structural elements of the object.

However, this is not enough for the simulation statistical model (ISM), in which the maintenance processes must be modeled. For the ISM, it is necessary to specify specific elements whose failures-recoveries must be modeled.

Let us introduce the concept of a set of recoverable elements E_b as follows (fig. 2). The set E_b must include structural elements that will be replaced in the event of object failures. The set E_b includes the most repairable elements, that is, elements whose replacement time is minimal, these are the so-called typical replacement elements (TRE). The set E_b must satisfy the requirements of completeness and non-redundancy.

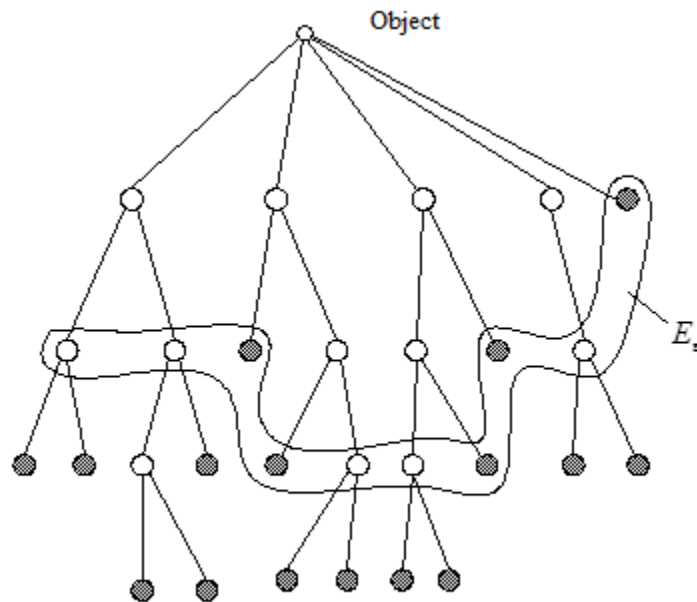


Figure 2 – Towards an explanation of set E_b

The completeness requirement is that the set must include all elements whose failures can lead to the failure of the object. Formally, the completeness requirement is ensured by the following condition: there must not be a single path between the root of the tree (object) and a hanging node (element- ZRP) that does not contain an element belonging to the set E_b (such an element must be unique).

The non-redundancy requirement is that the set E_b must not contain more than one element belonging to the path between the root of the tree and any hanging node.

With such a definition of the set E_b and with the previously adopted assumption of a sequential reliable connection of structural elements, the probability of failure-free operation of the

object is equal to

$$P(t) = \prod_{i \in E_b} [1 - F_i(t)], \quad (15)$$

where $F_i(t)$ - is the probability of failure the i -th element from the set E_b .

The probability $P(t)$ does not depend on the choice of the set E_b .

Similarly, the value of the mean time to failure does not depend on and E_b

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (16)$$

If the object is considered as recoverable, then the failure rate parameter $\omega(t)$ and the mean time between failures should be used as reliability indicators T_0 [14].

When connecting elements in series, the failure rate parameter is defined as the sum

$$\omega(t) = \sum_{i \in E_b} \omega_i(t), \quad (17)$$

where $\omega_i(t)$ - failure flow parameter of i -th element from the set E_b .

The failure flow parameter of i -th element $\omega_i(t)$ is found as a solution to an integral equation of the following type [13, 14]:

$$\omega_i(t) = f_i(t) + \int_0^t f_i(t-x) \omega_i(x) dx. \quad (18)$$

where $f_i(t)$ - probability density of failure of i -th element ($i \in E_b$).

The failure flow parameter always has a steady-state value

$$\omega^\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t).$$

In this case, the mean time between failures of object is equal to

$$T_0 = 1/\omega^\infty.$$

For real technical objects within the operating period T_s of interest to the user, steady-state value of failure flow parameter may not occur. In this case, the mean time to failure of the object is determined by the formula:

$$T_0 = T_0(T_s) = \frac{1}{\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \omega(t) dt}. \quad (19)$$

The value T_0 (in contrast to T_{cp}) depends significantly on the choice of set E_b . The higher average level of elements included in E_b , the greater value of T_0 . This is easily explained, since when replacing larger structural elements, a greater number of serviceable elements are simultaneously updated. Consequently, the higher structural level of restored elements (smaller the level number u), the greater the proportion of elements is updated after current repairs, which leads

to an increase in the indicator T_0 .

Conclusions. The failure-free operation model (FM) allows obtaining estimates of the failure-free operation indicators (FMI) of individual structural elements and the object as a whole based on the FMI information of the elements of the lower structural level. The FR represents the hierarchical structural structure of the object. Structural elements of a certain u -th structural level are a sequential (in terms of reliability) connection of the elements of $(u+1)$ -th level included in it. Individual structural elements can represent a redundant group (parallel connection) of similar elements. Thus, with the help of FM, the representation of a hierarchical constructive structure is combined with an arbitrary serial-parallel reliability structure of an object, which is an acceptable representation for most technical objects encountered in practice.

The DN -distribution is used as a failure model for all elements and the object as a whole. The DN -distribution is considered an adequate model of gradual failures both for electronic products and for various mechanical units and elements. An important advantage of DN -distribution is also that its appearance is preserved when transforming the reliability structure of the system. It is this feature of DN -distribution that made it possible to apply it to a system with a hierarchical structure.

REFERENCES:

- 1 Sergey Lenkov, Konstantin Borjak, Gennady Banzak, Vadim Braun, ets. (2002) Forecasting to reliability complex object radio-electronic technology and optimization parameter their technical usage with use the simulation statistical modelsю. Monograph in English. Odessa: Publishing house "VMV", 252 p.
- 2 Jason Brown, Lucas Mol (2017) On the roots of all-terminal reliability polynomials. Discrete Mathematics, Volume 340, Issue6, June, 1287-1299.
- 3 Lirong Cui, Yan Li, Jingyuan Shen, Cong Lin (2016) Reliability for discrete state systems with cyclic missions periods. Applied Mathematical Modtlling, Volumt 40, Issues 23-24, December, 10783-10799.
- 4 Iris Tien, Armen Der Kiureghian (2016) Algorithms for Bayesian network modeling and reliability assessment of infrastructure systems. Reability Engineering & System Safety, Volume 156, December, 134-147.
- 5 Volokh O.P. (2005) Methods of substantiation rational values operiodicity of maintenance of machines of engineering armament during operation. Collection of scientific works of Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv, 29-32.
- 6 Boryak K.F (2009) Faultlessness model of a complex recoverable object of electronic equipment. Collection of scientific works of Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv, 33-41.
- 7 Mikhalevich V.S., Volkovich V.L. (1982) Computational methods of research and design of complex systems. M.: Science, 286 p.
- 8 Braun V.O., Boryak K.F., Lantvoyt O.B., Tsytsarev V.N. (2008) Modeling of maintenance processes of complex reconstructed objects of radio-electronic equipment. News of the Engineering Academy of Ukraine. K., №1. 47 – 52.
- 9 Boryak K.F. (2008) Research of the process of maintenance complex renewable objects of electronic equipment with the help of simulation statistical model. Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine. K., №2. 85 – 91.
- 10 Banzak H.V., Banzak O.V., Vozikova L.M. (2020) Simulation of technical maintenance process with adaptive change of control period. The 1st International scientific and practical conference "The world of science and innovation" Cognum Publishing House, London, United Kingdom. 10-14.
- 11 Banzak H.V., Boryak K.F., TSytsarev V.N. (2010) Reliability database of complex objects of radio-electronic equipment. Collection of scientific works of the Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv. № 27. 89 – 97.
- 12 Banzak O.V., Sieliykov O.V., Olenev M.V., Dobrovolskaya S.V., Konovalenko O.I. (2010) Research processes of gamma radiation detector for developing a portable digital spectrometer. Collection of scientific works of the Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv. № 69. 5 - 13.
- 13 Nataliya Lytvynenko, Serhii Lienkov, Olexander Lytvynenko, Hennadii Banzak, (2020) Development of Geoinformation Technology for Monitoring Events on the Basis of Data from Unstructured

14 Oksana Banzak, Hennadii Banzak, Oleg Leshchenko, Antonina Gaber, (2024) Digital spectrometer gamma radiation for radiation in the field. The 8th International scientific and practical conference "European congress of scientific achievements" (August 12-14, 2024) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 64-69.

**к.т.н., доц. Назаренко О.А., к.т.н., доц. Банзак Г.В.,
д.т.н., проф. Лєнков С.В., д.т.н., проф. Сєлюков О.В.**

РОЗРОБКА МОДЕЛІ БЕЗВІДМОВНОСТІ СКЛАДНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБ'ЄКТУ

Складні технічні об'єкти сьогодні у суспільстві мають виключно важливе значення. Йдеться насамперед про різні радіоелектронні комплекси військового та спеціального призначення, радіолокаційні станції, автоматизовані системи управління (повітряним рухом, об'єктами енергетики тощо). Від рівня безвідмовності таких об'єктів залежить обороноздатність держави, економічна безпека, життя сотень та тисяч людей.

Такі об'єкти належать до класу об'єктів, що відновлюються, тривалого багаторазового застосування. Вони, як правило, є дорогими та потребують значних витрат на їх експлуатацію. Для забезпечення необхідного рівня безвідмовності в процесі їх експлуатації зазвичай проводиться технічне обслуговування (ТО), суть якого полягає у своєчасній запобіжній заміні елементів, що знаходяться в стані перед відмовою.

Характерною особливістю складних технічних об'єктів спеціального призначення є наявність у їхньому складі великої кількості (десятки, сотні тисяч) різномісних комплектуючих елементів, що мають різний рівень надійності, різні закономірності процесів їхнього зносу та старіння. Ця особливість вимагає більш тонкого підходу до організації та планування ТО у процесі їх експлуатації.

Як модель відмов для всіх елементів та об'єкта загалом використовується DN-розподіл. DN-розподіл вважається адекватною моделлю поступових відмов як виробів електронної техніки, так різних механічних вузлів і елементів. Важливим достоїнством DN-розподілу також є те, що його вид зберігається при перетвореннях надійності системи. Саме ця особливість DN-розподілу дозволила застосувати його до системи, що має ієрархічну структуру.

Модель безвідмовності (МБ) дозволяє отримувати оцінки показників безвідмовності (ПБ) окремих конструктивних елементів та об'єкта загалом за інформацією про ПБ елементів нижнього конструктивного рівня. У МБ представляється ієрархічна конструктивна структура об'єкта. Конструктивні елементи деякого i -го конструктивного рівня є послідовним (у сенсі надійності) з'єднанням елементів, що входять до нього $(i+1)$ -го рівня. Окремі конструктивні елементи можуть бути резервованою групою (паралельне з'єднання) однотипних елементів.

Ключові слова: складні технічні об'єкти, автоматизовані системи управління, об'єкти, що відновлюються

МОДЕЛЮВАННЯ ВОДНОЇ ПОВЕРХНІ В УМОВАХ МОРСЬКОГО ХВИЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-ПОДІБНИХ ФУНКЦІЙ

Оцінка морехідності суден є важливим етапом їх проектування. Дане поняття визначається комплексом властивостей судна, серед яких невід’ємними складовими є режим його хитавиці, оцінка можливості виникнення явища слемінгу, а також заливання палуби, а також розгону гребного гвинта. Усі ці явища є достатньо небезпечними, а одним із основних факторів, що їх визначають, є характеристика водної поверхні, на якій знаходиться судно. При наявності відомостей про цю поверхню стає можливим проведення прямого динамічного моделювання поведінки корпусу судна на хвилях із подальшою оцінкою перелічених складових морехідності. Таким чином, актуальною є розробка способів завдання хвильової поверхні для проведення моделювання поведінки корпусу судна на ній.

Традиційним підходом вважається апроксимація хвильової поверхні суперпозицією гармонічних залежностей, таких як рівняння плоскої хвилі. при цьому не враховуються реальні властивості морських хвиль, які є обмеженими по ширині (у поперечному перерізі), а також не утворюють періодичної картини. Для наближення моделі хвильової поверхні до її реальної форми доцільно перейти до використання вейвлетів замість гармонічних функцій. Вейвлети мають основну центральну ділянку, що фактично еквівалентна морській хвилі, а також невеликі крайові осцилюючі ділянки. Для зменшення впливу цих бокових ділянок в роботі запропоновано використання піднесення традиційної вейвлет-функції до степеня (більше одиниці), що дозволяє майже повністю позбутися цих ділянок при значенні показника степеня не більше 3-4. Одновимірні функціональні залежності запропоновано об’єднувати у двовимірні структури, що при умові завдання різних за модулем хвильових чисел (тобто довжин хвиль по різних осям координат) дозволяє створювати реалістичні картини морського хвилювання.

В роботі реалізовано програмний продукт, що дозволяє отримання динамічних анімацій поширення хвиль, створених на основі запропонованих функціональних залежностей. Отримані результати можуть бути корисними при моделюванні режимів руху корпусу судна на хвилях з використанням заспокоювачів хитавиці та для оцінки їх ефективності.

Ключові слова: моделювання поверхні, морське хвилювання, вейвлет-функції, хитавиця судна, кильова хитавиця.

Вступ та постановка задачі. Перебування на морському хвилюванні є однією з невід’ємних складових процесу експлуатації суден. Поведінка корпусу судна у штормових умовах впливає не тільки на якість виконання ним основних курсових завдань, а й може впливати на показники живучості судна в цілому. В залежності від конкретних умов, що виникають під час розміщення судна на хвилях, можуть виникати загрози як місцевій міцності (що особливо актуально для областей концентрації локальних механічних навантажень типу бульба судна, місць кріплення пропульсивної підсистеми, кріплень обшиви до елементів жорсткості корпусу, тощо), так і загальній міцності його корпусу. В особливо критичних умовах поздовжня (кільова) хитавиця може привести до злому корпусу судна (спершу – поява пластичного шарніру на корпусі, далі – його розрив), в результаті чого затоплення відбувається за лічені хвилини. Таким чином, важливим аспектом при проектуванні та експлуатації суден є необхідність урахування різних режимів хитавиці судна та наслідків, до яких вони можуть привести [1].

Одним із способів оцінки небезпек, що виникають для корпусу судна у штормових умовах, є моделювання процесу його руху на хвилях, для чого, безперечно, слід задаватися

певною картиною (характеристиками) цих хвиль. Слід відмітити, що особливу роль моделювання руху корпусу судна на хвилях відіграє в процесі оцінки ефективності таких технічних пристроїв, призначених для стабілізації судна, як заспокоювачі хитавиці. Так, у попередній роботі [2] авторами було розглянуто систему управління заспокоювачем хитавиці реактивної (аналогічної до водострумнинної) дії, оцінку ефективності якої доцільно також провести, розміщуючи судно на певній хвильовій поверхні (у динамічному режимі) із подальшим визначенням параметрів його хитавиці різних типів.

Слід відмітити, що завдання геометрії хвильової поверхні у формі, максимально близькій до реальних штормових умов, підвищує якість процесу моделювання та покращує точність його результатів (тобто поліпшує їх відповідність до реальних процесів) [3]. Таким чином, виникає необхідність у розробці методу апроксимації хвильової поверхні, яка фактично представляє собою двовимірну функцію виду:

$$z = f(x, y) \quad (1)$$

Бажано, щоб вказана функція (1) була універсальною і максимально гнучкою, дозволяючи шляхом налаштування своїх параметрів проводити симуляцію різних типів морського хвилювання (вітрове, усамітненої солітонної природи типу цунамі та хвиль-вбивць, залишкове і т.п.).

Аналіз останніх досліджень. Для оцінки небезпеки найбільш негативного сценарію, яким, безперечно, є втрата загальної міцності корпусу, судно традиційно ставлять на резонансну хвилю, довжина якої строго рівна (хвиля Ріда) або знаходиться у певній відповідності до довжини самого судна [4]. Напрямок руху хвилі в загальному випадку задається хвильовим вектором $\mathbf{k} = \{k_x, k_y\}$, а шукана залежність типу (1) має вид:

$$z(\mathbf{r}, t) = A \cdot \cos(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t + \varphi_0) \quad (2)$$

де z – висота хвильової поверхні над рівнем моря при спокійній воді;

$\mathbf{r}$ – радіус-вектор (двовимірний, $\mathbf{r} = \{x, y\}$) точки, де визначається висота хвильової поверхні;

A – амплітуда хвилі;

ω – частота хвилі (циклічна);

φ_0 – початкова фаза коливань.

Рівняння плоскої хвилі (1) може бути корисним для окремих частинних випадків (як, наприклад, аналіз загальної міцності), але, зважаючи на просту форму залежності (2) – рис.1, що не відповідає реальній картині хвилювання, очевидно, що для більш докладного моделювання, яке включає в тому числі і аналіз місцевої міцності, слід переходити до більш реалістичних моделей [5].

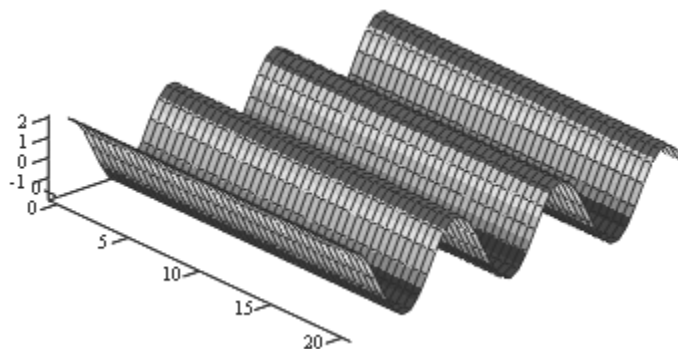


Рисунок 1 – Приклад реалізації хвильової поверхні на основі рівняння плоскої хвилі (для параметрів $\mathbf{k} = \{0, 1\}$, $A = 2$)

Традиційним способом описання більш складної хвильової поверхні є використання спектральних характеристик хвильового розподілу, зокрема спектральної густини (як функції циклічної частоти хвиль) енергії хвилювання, що припадає на одиницю площі

поверхні [6]. Дана величина позначається $S(\omega)$ і може задаватися формулами, що доцільно використовувати в різних умовах, а саме: спектром Бретшнайдера (прийнятий у якості міжнародного стандарту у 60-і рр.), спектром Пірсона-Московіца (характерний для глибокої води, стійкого вітру та розвинутого хвилювання), спектром JONSWAP (для прибережних зон), вітчизняними спектрами Вознесенського-Нецветаєва та двухпараметричним ідеалізованим, спрощеним і т.д. [7] У всіх цих випадках відрізняється форма спектру, однак, при переході у часову область складовими хвилювання стають в цілому гармонічні коливання виду (2). Таким чином, результуюча форма поверхні задається формулою виду:

$$z(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \cos(\mathbf{k}_i \mathbf{r} - \omega_i t + \varphi_{0i}) \quad (3)$$

Слід відмітити, що результат побудови подібної поверхні значно краще описує нерегулярне хвилювання [8], як можна бачити на рис. 2.

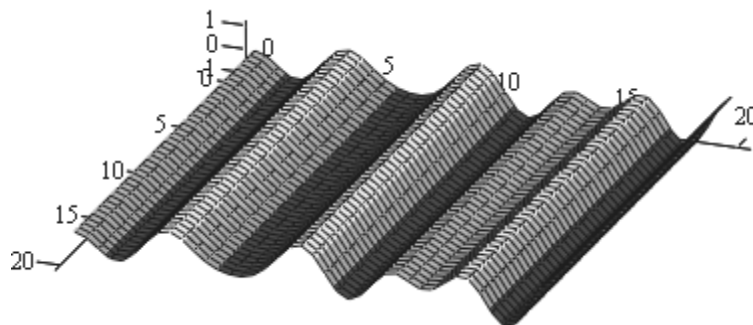


Рисунок 2 – Приклад реалізації нерегулярного хвилювання за залежністю виду (3)

Слід відмітити, що при використанні гармонічної залежності виду (2) у якості однієї коливальної складової, у модель закладається така її особливість, як нескінченні розміри хвильової картини у поперечному напрямку та її точний періодичний характер (хоча і з великим періодом). Реальне хвилювання характеризується хвилями, що мають скінченний поперечний розмір, а також повністю неперіодичний у часі характер. Відповідно, виникає необхідність у побудові функціональної залежності (1), яка би краще передавала реальну картину хвильової поверхні у порівнянні з традиційними методами, основаними на використанні гармонічних залежностей [9].

Виклад основного матеріалу. На відміну від залежності із постійною амплітудою (2), можна розглядати функції, в яких амплітуда поступово зменшується (наприклад, за поперечною до хвилі координатою). Така одновимірна залежність у найпростішому випадку має вигляд:

$$f(x) = \frac{\sin x}{x} \quad (4)$$

Характерною особливістю графіка (4) є наявність широкого центрального максимуму (аналогічно реальній хвилі) та невеликих осциляцій на його границях (що також в цілому відповідає реальній хвильовій картині) – рис. 3. Як відомо, сама назва такої функції «вейвлет» походить від слів «коротка хвиля», що у повній мірі відповідає задачі даного дослідження [10]. Одновимірні функції такого роду можуть мати різноманітні дилатаційні коефіцієнти у чисельнику та знаменнику, зсуви та інші варіанти перетворення функцій, однак основна суть залишається незмінною – така функція має основну центральну частину та швидко спадає до нуля на краях.

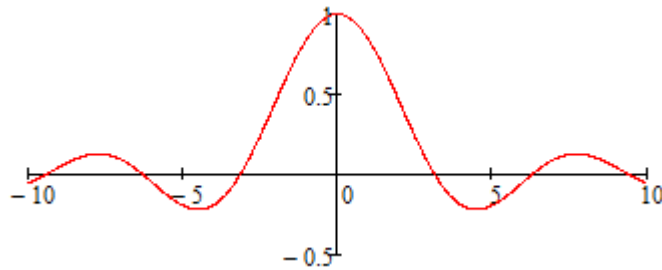


Рисунок 3 – Характерна форма функції типу «вейвлет»

Слід відмітити, що на основі вейвлетів можна зводити системи ортогональних функцій, переходячи до відповідних розкладань довільної функціональної залежності в узагальнений ряд Фур'є по вейвлет-подібним функціям [11]. Це дозволяє говорити про завдання спектру морського хвилювання, але заданого не через гармонічні функції, а вейвлет-подібні, форма яких є більш обґрунтованою з фізичної точки зору.

Описану поведінку вейвлет-подібних функцій слід адаптувати до двовимірного випадку (1). Профіль, наведений на рис.3, може прикладатися як до поперечного перерізу хвилі (адже усяка хвиля має скінчену ширину, перпендикулярну напрямку її поширення, а не простягається без змін у нескінченність, як залежність типу (2)), так і до поздовжнього (хоча і у дещо меншій мірі, адже реальний хвильовий профіль зазвичай не є симетричним, а близький до трохойди). Для вказаних цілей пропонується використовувати функціональну залежність виду:

$$z(x, y) = A \cdot \left(\frac{\sin(k_x(x - x_0 + V_x t))}{(k_x(x - x_0 + V_x t))} \right)^n \cdot \left(\frac{\sin(k_y(y - y_0 + V_y t))}{(k_y(y - y_0 + V_y t))} \right)^m, \quad (5)$$

де $(x_0; y_0)$ – координати центру хвилі;

V_x, V_y – швидкості переміщення хвилі по осям;

n, m – показники степеня, що можуть підсилювати поведінку графіка функції (5): якщо вони більше 1, то вейвлет швидше спадає, а якщо менше 1, то повільніше.

Вказана форма залежності (5) дозволяє реалізовувати різні варіанти усамітнених хвиль, що показані на рис. 4 – рис. 5.

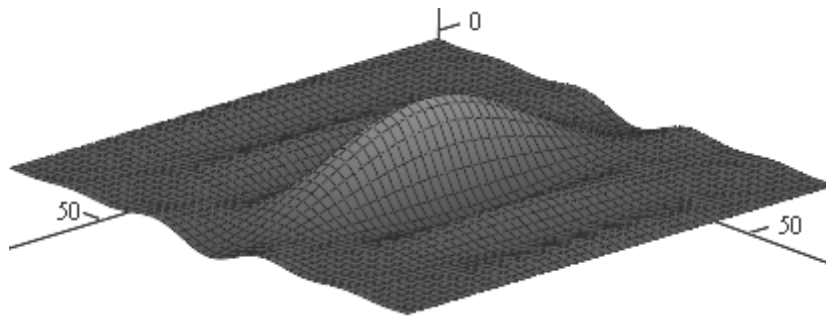


Рисунок 4 – Приклад реалістичної форми хвилі, що задається у вигляді двовимірного вейвлету ($k_x:k_y = 1:4, n = m = 1$)

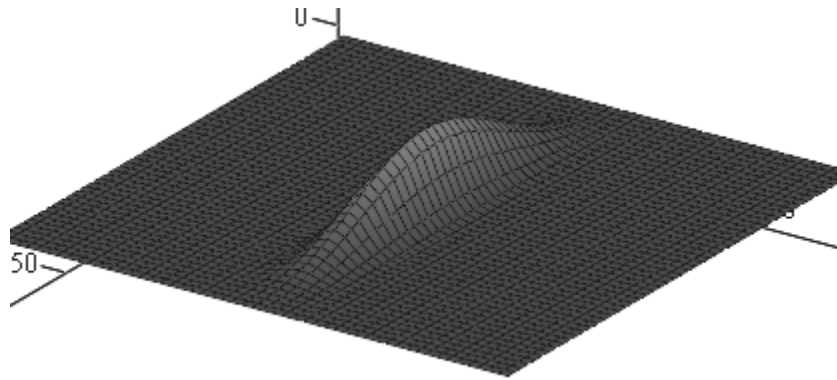


Рисунок 5 – Приклад реалістичної форми хвилі, що задається у вигляді двовимірного вейвлету, із швидким затуханням по краям ($k_x:k_y = 1:4$, $n = 2$, $m = 4$)

Як видно із порівняння рис. 4 та рис. 5, збільшення показників степеня m та n дозволяє зменшити бокові коливання, залишаючи в основному тільки центральний максимум функції.

Реалізація даного підходу у середовищі математичних розрахунків Mathcad (рис. 6) дозволяє проводити динамічні анімації поширення хвиль на основі вейвлетів, що загалом мають цілком реалістичний вид.

$$Z1(x, y, vx, vy) := A \cdot \left[\frac{\sin \left[\frac{2\pi \cdot (x + vx \cdot \text{FRAME} - x0)}{\lambda_x} \right]}{\left[\frac{2 \cdot \pi \cdot (x + vx \cdot \text{FRAME} - x0)}{\lambda_x} \right]} \right]^n \cdot \left[\frac{\sin \left[\frac{2\pi \cdot (y + vy \cdot \text{FRAME} - y0)}{\lambda_y} \right]}{\left[\frac{2\pi \cdot (y + vy \cdot \text{FRAME} - y0)}{\lambda_y} \right]} \right]^m$$

$$N := 5 \quad i := 0..N-1 \quad ra := 200$$

$$x0_i := \text{rnd}(ra) \quad y0_i := \text{rnd}(1-ra) \quad vx_i := 1 + \frac{\text{rnd}(2)}{2} \quad vy_i := 2 + \frac{\text{rnd}(3)}{3}$$

$$Z2(x, y) := \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} Z1(x - x0_i, y - y0_i, vx_i, vy_i) \quad +$$

Рисунок 6 – Реалізація запропонованого рішення у математичному пакеті

Для утворення комплексної хвильової картини, яка очевидно, складається не з однієї, а з великої кількості хвиль, можна проводити їх накладання по формулі, аналогічній (3), але яка оснований не на рівнянні плоскої хвилі, а на залежності виду (5). Відповідна формула із складанням показана на рис. 6 у вигляді функції $Z2(x, y)$. Приклад отриманої хвильової картини показано на рис. 7.

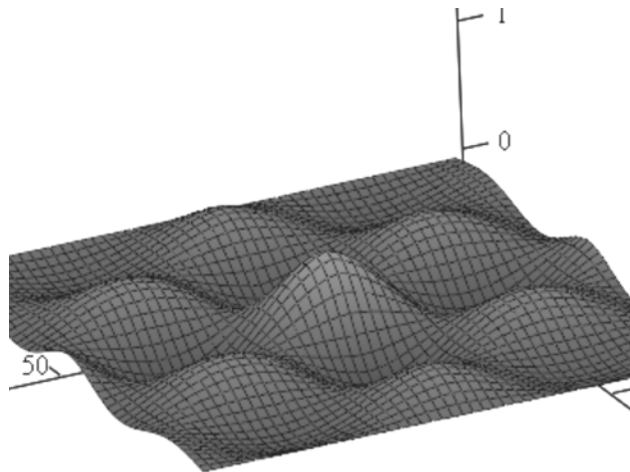


Рисунок 7 – Приклад ділянки реалістичної поверхні морського хвилювання, отриманий на основі вейвлет-подібних функцій

Формування конкретного набору (тобто параметрів) функціональних залежностей виду (5) може виконуватися на основі знання координат реальної морської поверхні, висоти якої можуть бути знятими під час морського хвилювання [12].

Висновки. Таким чином, можна констатувати, що використання вейвлетів, які представляють собою хвилі обмеженої ширини, дозволяє проводити формування водної поверхні моря під час хвилювання у більш реалістичному режимі. Використання даного типу функцій дозволяє також проводити розкладання функцій (в т.ч. двовимірних) в узагальнений ряд Фур'є по системі ортогональних вейвлетів. В роботі запропонована модифікація формули, що задає одну усамітнену хвилю, яка дозволяє гнучко налаштовувати параметри і зовнішній вигляд відповідної геометричної форми цієї хвилі. Дане представлення може бути корисним при моделюванні поведінки корпусу судна під час його знаходження у штормових умовах, зокрема, при оцінці ефективності роботи заспокоювача хитавиці (при наявності такого у складі суднових підсистем).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Acanfora M., Balsamo F. The Smart Detection of Ship Severe Roll Motions and Decision-Making for Evasive Actions // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 8. – P. 415. <https://doi.org/10.3390/jmse8060415>
2. Гайша О. О., Онищенко О. А., Гайша О. О. Аналіз якості функціонування системи нечіткого управління заспокоювачем хитавиці реактивної дії // *Збірник наукових праць ВІ КНУ імені Тараса Шевченка*. – 2024. – №83. – С. 27-33.
3. Гайша О. О., Гайша О. О. Структура даних для представлення інформації про хвилюву поверхню навколо судна // *Збірник наукових праць ВІ КНУ*. – 2016. – №52. – С. 7-12.
4. De Luca F., Pensa C., Pigazzini R. Experimental Assessment of Planing Hulls Added Resistance in Regular Waves // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 11. – P. 141. <https://doi.org/10.3390/jmse11010141>
5. Nielsen U. D., Brodtkorb A. H., Sørensen A. J. Sea state estimation using multiple ships simultaneously as sailing wave buoys // *Applied Ocean Research*. – 2019. – Vol. 83. – P. 65-76. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.12.004>
6. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. Л., Заичко С. І. Бортові автоматизовані системи контролю мореходності. – Одеса: Фенікс, 2005. – 272 с.
7. Mukhlis, Azizah, Mohd Zaki N. I., Abu Husain M. K., Syed Ahmad S. Z. A., Najafian G. Numerical formulation based on ocean wave mechanics for offshore structure analysis – a review //

Ships and Offshore Structures. – 2021. – Vol. 17. – P. 1-12.
<https://doi.org/10.1080/17445302.2021.1937880>

8. Smeltzer B. K., Æsøy E., Ellingsen S. Å. Observation of surface wave patterns modified by sub-surface shear currents // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2019. – Vol. 873. – P. 508-530.

9. Bhatia M., Das N., Dutta P., Chattopadhyay H. Numerical analysis on the seakeeping performances of a full-scale container ship hull using strip theory // *Physics of Fluids*. – 2023. – Vol. 35, No. 11. – P. 114106. <https://doi.org/10.1063/5.0172626>

10. Jeschke S., Skřivan T., Müller-Fischer M., Chentanez N., Macklin M., Wojtan C. Water Surface Wavelets // *ACM Transactions on Graphics*. – 2018. – Vol. 37, No. 4. – P. 1-13.

11. Chernyshov P., Vrećica T., Nauri S., Toledo Y. Wavelet-Based 2-D Sea Surface Reconstruction Method From Nearshore X-Band Radar Image Sequences // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 60. – Art no. 511131. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3155352>

12. Chen Z., Zhang B., He Y., Qiu Z., Perrie W. A new modulation transfer function for ocean wave spectra retrieval from X-band marine radar imagery // *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*. – 2015. – Vol. 33, No. 5. – P. 1132-1141.

REFERENCES:

1. Acanfora, M. and Balsamo, F., 2020. The smart detection of ship severe roll motions and decision-making for evasive actions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, p.415. Available at: <https://doi.org/10.3390/jmse8060415>.

2. Гайша, О.О., Онищенко, О.А. and Гайша, О.О., 2024. Аналіз якості функціонування системи нечіткого управління заспокоювачем хитавиці реактивної дії. *Збірник наукових праць ВІ КНУ імені Тараса Шевченка*, (83), pp.27-33.

3. Гайша, О.О. and Гайша, О.О., 2016. Структура даних для представлення інформації про хвильову поверхню навколо судна. *Збірник наукових праць ВІ КНУ імені Тараса Шевченка*, (52), pp.7-12.

4. De Luca, F., Pensa, C. and Pigazzini, R., 2023. Experimental assessment of planing hulls added resistance in regular waves. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, p.141. Available at: <https://doi.org/10.3390/jmse11010141>.

5. Nielsen, U.D., Brodtkorb, A.H. and Sørensen, A.J., 2019. Sea state estimation using multiple ships simultaneously as sailing wave buoys. *Applied Ocean Research*, 83, pp.65-76. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.12.004>.

6. Вагущенко, Л.Л., Вагущенко, А.Л. and Заичко, С.І., 2005. Бортові автоматизовані системи контролю мореходності. Одеса: *Фенікс*.

7. Mukhlas, M., Mohd Zaki, N.I., Abu Husain, M.K., Syed Ahmad, S.Z.A. and Najafian, G., 2021. Numerical formulation based on ocean wave mechanics for offshore structure analysis – a review. *Ships and Offshore Structures*, 17, pp.1-12. Available at: <https://doi.org/10.1080/17445302.2021.1937880>.

8. Smeltzer, B.K., Æsøy, E. and Ellingsen, S.Å., 2019. Observation of surface wave patterns modified by sub-surface shear currents. *Journal of Fluid Mechanics*, 873, pp.508-530.

9. Bhatia, M., Das, N., Dutta, P. and Chattopadhyay, H., 2023. Numerical analysis on the seakeeping performances of a full-scale container ship hull using strip theory. *Physics of Fluids*, 35(11), p.114106. Available at: <https://doi.org/10.1063/5.0172626>.

10. Jeschke, S., Skřivan, T., Müller-Fischer, M., Chentanez, N., Macklin, M. and Wojtan, C., 2018. Water surface wavelets. *ACM Transactions on Graphics*, 37(4), pp.1-13.

11. Chernyshov, P., Vrećica, T., Nauri, S. and Toledo, Y., 2022. Wavelet-based 2-D sea surface reconstruction method from nearshore X-band radar image sequences. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, Art no. 511131. Available at: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3155352>.

12. Chen, Z., Zhang, B., He, Y., Qiu, Z. and Perrie, W., 2015. A new modulation transfer function for ocean wave spectra retrieval from X-band marine radar imagery. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 33(5), pp.1132-1141.

Haisha O.O., Doc. of Tech. Sci. Prof. Onishchenko O.A., Ph. D Haisha O.O.

MODELING OF THE WATER SURFACE UNDER THE CONDITIONS OF MARINE WAVES ON THE BASE OF WAVELET-LIKE FUNCTIONS

The assessment of a ship's seakeeping performance is a crucial stage in its design. This concept is determined by a set of vessel properties, including the behavior of its rolling motion, the evaluation of slamming occurrence, deck wetness, and propeller racing. All these phenomena are sufficiently hazardous, and one of the primary factors influencing them is the characteristic of the water surface on which the vessel operates. When information about this surface is available, it becomes possible to conduct direct dynamic modeling of hull behavior on waves, allowing for an assessment of the listed seakeeping factors. Thus, the development of methods for defining the wave surface to model hull behavior on it is highly relevant.

A traditional approach approximates the wave surface by superimposing harmonic dependencies, such as the flat wave equation. However, this does not account for the actual characteristics of sea waves, which are limited in width (in cross-section) and do not form a periodic pattern. To bring the wave surface model closer to its real form, it is advisable to shift to using wavelets instead of harmonic functions. Wavelets possess a central main region that is practically equivalent to a sea wave, as well as small oscillatory regions at the edges. To reduce the influence of these side regions, this work proposes raising the traditional wavelet function to a power (greater than one), allowing almost complete elimination of these regions when the exponent is set to a value up to 3 or 4. One-dimensional functional dependencies are suggested to be combined into two-dimensional structures, which, by assigning different wave numbers (i.e., wavelengths) along different coordinate axes, enables the creation of realistic sea wave patterns.

The work includes the implementation of software that allows dynamic animations of wave propagation based on the proposed functional dependencies. The results obtained may be useful for modeling hull movement modes on waves using anti-roll devices and for evaluating their effectiveness.

Keywords: surface modeling, sea waves, wavelet functions, ship rocking, pitching.

РОБОТА ШТАБУ ЩОДО РОЗРАХУНКУ БОЙОВИХ СПРОМОЖНОСТЕЙ МЕХАНІЗОВАНОГО ПІДРОЗДІЛУ ТА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ІМОВІРНОСТІ УРАЖЕННЯ ЦІЛІ СУЧАСНИМИ ЗАСОБАМИ БЕЗПІЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ

В статті наводиться варіант розрахунку бойових спроможностей механізованої частини (з'єднання) за умови оснащення її західними зразками озброєння, військової техніки (ОВТ) з врахуванням відповідних коефіцієнтів бойової ефективності.

Визначено, що структурний підрозділ загальновійськового штабу S3 призначений для організації, координації та проведення планування бою (дій), підготовки підрозділів, управління ними в ході ведення бою (дій), а також проведення тактичних розрахунків та підготовка і надання пропозицій командирів для вироблення варіантів дій, проведення їх аналізу та порівняння, в т.ч. по ураженню броньованих цілей і живої сили противника.

Визначені вихідні дані для проведення розрахунку тривалості роботи штабу на місці фактична відстань пункту управління (ПУ) від діючих попереду підрозділів, допустима відстань ПУ згідно з умовами обстановки, час на згортання та розгортання, швидкість руху діючих попереду підрозділів і ПУ під час його переміщення. Це дозволяє розрахувати час для прийняття рішення командиром та час на відпрацювання директивних документів (попереднього та бойового розпоряджень, бойового наказу), в яких визначені порядок дій підрозділів та їх бойові завдання.

З переліку розрахунків, що проводяться органами управління в статті розглянуті бойові спроможності механізованої частини (з'єднання) по ураженню наземного противника вогнем танків, бойових машин піхоти, протитанкових засобів і стрілецької зброї, в т.ч. західних зразків.

Визначені навчальні бойові потенціали основних зразків озброєння та військової техніки дозволяють обрахувати потенційні бойові спроможності підрозділів оперативно-тактичного рівня та визначити ефективність системи вогню як складової побудови загальновійськового бою (організації тактичних дій).

Визначення втрат живої сили противника внаслідок використання тільки стрілецької зброї західного виробництва дозволяє визначити структуру та ешелонованість бойового порядку частини (з'єднання). Складовими для розрахунку втрат є: щільність вогню стрілецької зброї підрозділів, які обороняються на першій позиції у смузі наступу підрозділів, співвідношення щільностей вогню стрілецької зброї підрозділів, які наступають, та підрозділів, які обороняються та втрати при виході підрозділів, які атакують, на передній край оборони підрозділів, які обороняються.

Наведені залежності щодо визначення імовірності ураження цілі будь-якою зброєю за незалежної та незмінної кількості пострілів дозволяє розрахувати: потенційні можливості частини (з'єднання) по ураженню засобів повітряного нападу противника, зокрема БпЛА.

Ключові слова: бойові спроможності, механізована частина (з'єднання), коефіцієнт бойової ефективності, штаб оперативно-тактичного рівня, розрахунково-довідкові документи, імовірність ураження, методика розрахунку.

Вступ. Питанню розрахунку бойових спроможностей механізованих підрозділів на сьогоднішній момент, на жаль, в публічній сфері приділяється не достатньо уваги. В період з лютого 2022 року Сили оборони України отримали безпрецедентну кількість озброєння та військової техніки західного виробництва. Озброєння та військова техніка (ОВТ), що

надійшла, високотехнологічна, має величезний спектр технічних характеристик Її використання дозволяє збільшити бойові спроможності частин (з'єднань) всіх видів та родів військ (сил) Збройних Сил України щодо ураження як броньованої техніки противника, його живої сили, так і запасів військово-технічного майна.

Відповідні розрахунки для прийняття рішення загальновійськовим командиром частини (з'єднання) на бій (дії) здійснюють офіцери підпорядкованого штабу, який в свою чергу забезпечує єдність у роботі всіх ланок органу управління, взаємосумісність із штабами всіх складових Сил оборони держави та партнерами з НАТО.

Зазвичай, штаб (пункт управління – ПУ) оперативно-тактичної ланки включає наступні структурні підрозділи: особового складу (S1); розвідувальний (S2); оперативний (S3); логістики (S4); цивільно-військових відносин (S5); зв'язку (S6), інші [1]. Особливості організаційної структури кожного конкретного штабу, кількість службових осіб, що входять до складу його структурних підрозділів залежать від функціонального призначення штабу, специфіки покладених на нього завдань, режиму його роботи та інших факторів [2,3].

Відповідно до основних функцій з управління підрозділами секція S3 виконує наступні основні завдання: проводить необхідні тактичні розрахунки, готує пропозиції командирів для визначення варіантів дій і обрання з них основного: проводить розрахунки бойових можливостей штатних, доданих підрозділів, прораховує можливості противника та оцінює можливі втрати противника за умови підтримки артилерії та льотного ресурсу БпАК. Саме оцінка (порядок) розрахунку бойових спроможностей частини (з'єднання), а також розрахунок імовірності ураження будь-якої цілі за незалежної та залежної кількості пострілів різноманітними засобами розглядається в статті.

Аналіз останніх досліджень і публікацій та постановка задачі. Аналіз [5-8] свідчить, що і у військових публікаціях ГШ ЗС України [5], і у військових (навчальних) посібниках [6, 7], і в наукових публікаціях [8, 9] розкриваються тільки часткові питання розрахунку бойових спроможностей частин (підрозділів) з ураження противника. У [7] визначена методика розрахунку часу на підготовку підрозділів до ведення бою, розрахунок маршу, участі протитанкових засобів та засобів протиповітряної оборони в бою (тактичних діях), але не наведена загальна методика розрахунку вогневих спроможностей та спроможності по ураженню живої сили механізовано підрозділу на тактичному рівні.

У [8] надається обмежені розрахунки бойових можливостей ротної тактичної групи, що посилює бригаду територіальної оборони. Автори наголошують, що для обрахунку бойових спроможностей необхідний аналіз бойових дій, зброї і бойової техніки, завчасний вибір показників бойових можливостей, виходячи з призначення підрозділу, мети, яка досягається в результаті бойових дій підрозділу. На що в сучасних реаліях завжди не буде достатньо часу, який і не врахований в даній методиці.

У [9] визначена методика розрахунку ефективності прикриття наземних сил підрозділами ППО при веденні локальних конфліктів, але не врахований кількісно-якісний склад авіації, льотний ресурс противника, типи авіабомб, ракет, пілотуємих та безпілотних літальних апаратів типу Shahed-136 (Герань, Орлан-10), які мають власні характеристики.

Питанню оцінки та врахуванню бойових спроможностей частини (з'єднання), яка має на озброєнні парк ОВТ західного виробництва, врахування бойового потенціалу визначеного зразку при проведенні загальних розрахунків секцією S3 штабу й присвячена стаття.

Метою статті є: визначення структури штабу (елементу органу управління), його роботи з питання розрахунку бойових спроможностей частини (з'єднання), що укомплектована західними зразками ОВТ, а також розрахунок імовірності ураження цілі за незалежної та залежної кількості пострілів різноманітними засобами вогневого ураження.

Виклад основного матеріалу. Оперативний підрозділ (S3) є провідним структурним підрозділом штабу, який призначений для організації, координації та проведення планування бою (дій), підготовки підрозділів до бою (дій) та забезпечення управління ними в ході його ведення, планування, організації та приведення підпорядкованих підрозділів у бойову готовність, контролю рівня їх бойової готовності.

Його основними завданнями є [3,4]: розробка, організація і здійснення заходів щодо забезпечення постійної бойової готовності підрозділів; розрахунки бойових можливостей штатних, доданих підрозділів, оцінка можливих втрат противника; збір, узагальнення, аналіз та відображення даних обстановки за свої підрозділи та сусідів; формулювання висновків з оцінювання своїх підрозділів і сусідів, проведення тактичних розрахунків та підготовка і надання пропозицій командирів для вироблення варіантів дій, проведення їх аналізу та порівняння; розробка бойових наказів і розпоряджень; доведення завдань до підрозділів та контроль їх виконання; організація та підтримання взаємодії з підпорядкованими, взаємодіючими військовими частинами (підрозділами), сусідами, органами і підрозділами ІВФ та ПрО; координація роботи структурних підрозділів штабу з питань підготовки бою (дій), організації управління, взаємодії та всебічного забезпечення; підготовка донесень, зведень згідно та надання їх у вищий штаб; контроль за точним і своєчасним виконанням підрозділами наказів і розпоряджень командира.

Вихідними даними для проведення розрахунку тривалості роботи штабу на місці є: фактична відстань ПУ від діючих попереду підрозділів, допустима відстань ПУ згідно з умовами обстановки, час на згортання та розгортання, швидкість руху діючих попереду підрозділів і ПУ під час його переміщення.

Тривалість роботи ПУ на місці t розраховують за формулою [5,7].

$$t = (D - d) \left(\frac{1}{V_n} - \frac{1}{V_{пу}} \right) 60 - t_{p.з} \quad \text{при } D > d,$$

де: D – допустима відстань пункту управління від діючих попереду військ згідно з умовами обстановки;

d – фактична відстань пункту управління, км;

V_n – швидкість руху підрозділів, км/год;

$V_{пу}$ – швидкість руху пункту управління під час переміщення, км/год;

$T_{p.з}$ – тривалість розгортання і згортання пункту управління, хв.

Рішення та розрахунково-довідкові документи оформляється службовими особами оперативного підрозділу (S3) у декількох примірниках: 1-й примірник надається у вищий штаб, 2-й залишається в штабі і використовується для планування бою (дій).

Тактичні розрахунки відображають кількісно-якісні показники, майбутні результати застосування військ, що необхідні для оцінювання і порівняння варіантів дій, формулювання замислу і розробки плану бою (дій). Тактичні розрахунки оформлюються у вигляді таблиць, схем і графіків.

З переліку розрахунків, що проводяться органами управління в статті розглянуті бойові спроможності по ураженню наземного противника вогнем танків, бойових машин піхоти, протитанкових засобів і стрілецької зброї, в т.ч. західних зразків;

Ці можливості визначаються за формулою [5]:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n ПТЗ \cdot K_{ef} \cdot K_{зз} \cdot K_{дв}}{K_{пв} \cdot P_{\phi}},$$

де: $\sum_{i=1}^n ПТЗ$ – сумарна кількість протитанкових засобів;

K_{ef} – коефіцієнт ефективності зброї для заданого виду зброї;

$K_{зз}$ – коефіцієнт застосування зброї для боротьби з різними цілями;

$K_{пв}$ – коефіцієнт плануємих втрат противника;

P_{ϕ} – бойовий потенціал;

$K_{дв}$ – коефіцієнт допустимих втрат своїх військ;

Коефіцієнти, які зазначені в попередній формулі визначаються:

$$\sum_{i=1}^y = K_{il} \cdot m_{il} \cdot P_{oi1} + K_{i2} \cdot m_{i2} \cdot P_{oi2} + \dots + K_{in} \cdot m_{in} \cdot P_{oin} ,$$

де: $\sum_{i=1}^y$ – загальна кількість протитанкових засобів в підрозділі;

K_i – кількість протитанкових засобів певного типу, що є в підрозділі;

m_i – кількість підрозділів, де є дана зброя;

P_{oi} – бойовий потенціал для i -ого виду зброї, який визначає можливості цього виду зброї по знищенню бронетехніки противника.

Таблиця 1.

Навчальні бойові потенціали озброєння та військової техніки, в т.ч. західного виробництва

ОВТ	Бойовий потенціал	ОВТ	Бойовий потенціал
T-64БМ, T-72	3,1	ПК ПТКР “Корсар”	0,82
T-80У	3,2	ПК ПТКР “Стугна-П”	0,92
T-90	3,4	100-мм ПТГ МТ-12	0,8
БМП-1, БМП-1К	0,9	СПГ-9 “Спис”	0,3
БМП-2	0,92	РПГ-7В (LGL-7, RPG-7)	0,08
БМП-3	0,94	РПГ-16 (18,22)	0,12
БРМ-1К	0,15	СПУ ПТКР “Javelin”	1,66
БТР-60, БТР-70	0,12	СПУ ПТКР “Tow-2”	1,1
БТР-80	0,14	СПУ ПТКР “NLAW”	1,85
“Abrams”	3,5	ПУ ПТКР “Milan”	0,82
“Leopard -2”	3,4	ПУ ПТКР “Dragon”	0,71
M2 “Bradley”	0,9	105-мм БО М-27 А1	0,34
БМП “Marder”	0,65	90-мм БО М-60	0,27
БТР М113	0,18	РПГ 90-мм М-67	0,32
M3 “Bradley”	0,89	44 vv “Panzerfaust”	0,084
60-мм М СМА	0,23	ПЗРК “Perun”	0,21
УАГ-40	0,18	БМ “Spartan”	0,74
240-мм MLRS	3,7	БМ HMMWV	0,67
155-мм Г FH-70	0,86	БМ “Mastiff”	0,94
155-мм СГ М-109	1,9	ЗСУ-20-6 М-163 “Vulkano”	0,79
120-мм СМ М-113	0,92	ЗСУ-35-2 “Gepard”	0,81
Mi-24 (Mi-35)	2,8	Mi-8MT (Mi-17)	1,0

З метою визначення втрат живої сили противника внаслідок використання стрілецької зброї використаємо наступний методичний апарат.

1. Визначаємо щільність вогню стрілецької зброї $\Pi_{с,з}^H$ підрозділів, які наступають, за формулою [5]:

$$\Pi_{с,з}^H = \frac{\sum_{i=1}^n N_{с,з_i}^H \cdot G_{с,з_i}^H}{Z_{\phi}^H},$$

де: $N_{с,з_i}^H$ – кількість одиниць СЗ i -го типу у підрозділах, які наступають;

$G_{с,з_i}^H$ – бойова швидкостріельність СЗ i -го типу підрозділів, які наступають;

Z_{ϕ}^H – фронт наступу атакуючого ешелону;

n – кількість типів стрілецької зброї в підрозділах, які наступають.

2. Визначаємо щільність вогню стрілецької зброї $\Pi_{с,з}^{об}$ підрозділів, які обороняються на першій позиції у смузі наступу підрозділів, за формулою [5]:

$$\Pi_{с.з}^{об} = \frac{\sum_{i=1}^m N_{с.з_i}^{об} G_{с.з_i}^{об}}{Z_{ф}^{об}},$$

де: $N_{с.з_i}^{об}$ – кількість одиниць СЗ i -го типу у підрозділах, які обороняються

$G_{с.з_i}^{об}$ – бойова швидкострільність СЗ i -го типу підрозділів, які обороняються;

$Z_{ф}^{об}$ – фронт оборони підрозділів, які обороняються на першій позиції;

m – кількість типів СЗ в підрозділах, які обороняються.

3. Розраховуємо співвідношення щільностей вогню СЗ підрозділів, які наступають, та підрозділів, які обороняються, $C_{с.з}$ за формулою:

$$C_{с.з} = \frac{\Pi_{с.з}^н}{\Pi_{с.з}^{об}}.$$

4. Визначаємо втрати особового складу протидіючих сторін, використовуючи дані таблиці. Втрати розраховані на момент виходу підрозділів, які атакують, на передній край оборони підрозділів, які обороняються.

Таблиця 2

Час доби	Темп наступу, км/год	Вид бою	Втрати при співвідношенні щільностей вогню (противник:свої війська), %					
			1 (1:1)	0,5 (1:2)	0,33 (1:3)	0,25 (1:4)	0,2 (1:5)	0,16 (1:6)
День	2	Наступ	100	88	49	30	18	10
		Оборона	2	28	56	84	100	100
	5	Наступ	100	48	30	20	15	11
		Оборона	6	20	33	46	60	73
Ніч	2	Наступ	100	62	37	26	18	13
		Оборона	3	24	42	60	77	85
	5	Наступ	70	33	21	15	11	9
		Оборона	6	15	23	32	41	49

У разі наступу механізованих (піхотних) підрозділів разом з танковими в єдиному бойовому порядку втрати особового складу будуть на 35...50% нижче наведених у таблиці.

Імовірність ураження цілі будь-якою зброєю визначається залежністю [10-12]:

$$W(n) = \sum_{i=1}^n P_{n,m} G(m),$$

де: $P_{n,m}$ – імовірність попадання в ціль рівно m снарядів при n запланованих пострілах.

За не залежної кількості пострілів (засобів ППО, ударних, FPV-дронів) та незмінній імовірності ураження за будь-якої кількості пострілів значення $P_{m,n}$ визначається за формулою [10]:

$$P_{n,m} = C_n^m p^m (1-p)^{n-m} = C_n^m p^m q^{n-m},$$

де: p – імовірність ураження в ціль при одному застосуванні засобу вогневого ураження БпАК.

За залежної кількості пострілів в схемі двох груп помилок стрільби (перша група – індивідуальні, тобто ті, що не повторюються при використанні наступного з врахуванням внесених поправок, друга – групові, тобто ті, що повторюються при наступному пострілі, який проведено без коригувань) значення $P_{n,m}$ визначається за формулою [10]:

$$P_{n,m} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C_n^m [p(x_r, y_r)]^m \cdot [1 - p(x_r, y_r)]^{n-m} \int (x_r, y_r) dx_r dy_r,$$

де: $p(x_r, y_r)$ – імовірність влучення в ціль, яка розрахована за умови, що помилка другої

групи x_r, y_r .

Якщо початок системи координат xOy суміщено з центром цілі й направлення координат вісі паралельні головній вісі еліпсу помилок першої групи, тоді:

$$p(x_r, y_r) = \int \int_{(S)} \frac{1}{2\pi\sigma_{x,n}\sigma_{y,n}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-x_r-\overline{x_1})^2}{\sigma_{x,n}^2} + \frac{(y-y_r-\overline{y_1})^2}{\sigma_{y,n}^2}\right]\right\} dx dy,$$

де: $\overline{x_1}, \overline{y_1}$ – координати точки прицілювання;

$\sigma_{x,n}, \sigma_{y,n}$ – середнє квадратичне відхилення індивідуальних помилок.

Для одиничного закону ураження, а саме: $G(m) = \begin{cases} 0 & \text{якщо } m < 0 \\ 1 & \text{якщо } m \geq 0 \end{cases}$ імовірність ураження цілі

дорівнює імовірності хоча б одного потрапляння в неї, тобто:

$$W(n) = R_{n,1}$$

За незалежних пострілів (різних засобів ураження) значення $R_{n,1}$ визначається як:

$$R_{n,1} = 1 - (1 - p)^n$$

При залежних пострілах в системі двох груп помилок стрільби значення $R_{n,1}$ визначається за формулою:

$$P_{n,1} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \{1 - [1 - p(x_r, y_r)]^n\} \cdot \int (x_r, y_r) dx_r dy_r$$

Висновки. Наведений апарат розрахунку бойових спроможностей механізованої частини (з'єднання) за умови оснащення її західними зразками озброєння, військової техніки (ОВТ) з врахуванням відповідних коефіцієнтів бойової ефективності дозволяє структурному підрозділу загальновійськового штабу СЗ проводити тактичні розрахунки, зокрема, щодо ураження броньованих цілей і живої сили противника.

Визначений порядок розрахунку тривалості роботи штабу на місці, вихідними даними якого є: фактична відстань ПУ від діючих попереду підрозділів, час на згортання та розгортання, швидкість руху діючих попереду підрозділів і ПУ під час його переміщення дозволяє розрахувати термін часу щодо організації бою нижчестоячої ланки.

Апарат розрахунку бойових спроможностей механізованої частини (з'єднання) по ураженню наземного противника вогнем танків, бойових машин піхоти, протитанкових засобів і стрілецької зброї, в т.ч. західних зразків та визначені навчальні бойові потенціали основних зразків ОВТ західного виробництва дозволяють обрахувати потенційні бойові спроможності підрозділів оперативно-тактичного рівня.

Апарат визначення втрат живої сили противника внаслідок використання тільки стрілецької зброї західного виробництва дозволяє визначити бойовий порядок підрозділів, необхідних для відбиття атак, зокрема, штурмових груп перед переднім краєм оборони.

В роботі на основі проведеного аналізу, запропоновано підхід до розрахунку бойових спроможностей частини, (з'єднання), на озброєнні якої знаходиться ОВТ західного виробництва та розрахувати їх потенційні можливості по ураженню засобів повітряного нападу противника, зокрема БпЛА.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Настанова з підготовки персоналу у Збройних силах України. ВКП 7-00(01).01. Головне управління доктрин та підготовки ГШ Збройних сил України. К.: 2020, 52 с.
2. ВП 7-(01,02,04)11.01. Методичні рекомендації роботи штабного офіцера тактичної ланки. Управління бойової підготовки командування СВ ЗСУ спільно НАСВ ім. Гетьмана Петра Сагайдачного. К., 2019.

3. Методичні рекомендації щодо застосування військ (сил) (для врахування під час набуття спроможностей військами (силами) для виконання завдань за призначенням). Генеральний Штаб Збройних сил України. – К.: ГШ ЗСУ, 2019.
4. Військовий посібник ГШ ЗС України про стандарти ведення бойових дій у ЗС держав НАТО (ВП 2.01.3; ВП 3.21.20; ВП 5.0А) / ГШ ЗСУ. – К.: ГШ ЗСУ, 2017.
5. ВП 7-01(11)56.01. Тактична підготовка механізованого батальйону. Метод. посібн. Центр оперативних стандартів і методики підготовки ЗСУ спільно з головним управлінням доктрин та підготовки ГШ ЗСУ. К.: ГШ ЗСУ, 2021.
6. Військовий посібник ГШ ЗС України про стандарти ведення бойових дій у ЗС держав НАТО (ВП 2.01.3; ВП 3.21.20; ВП 5.0А) / ГШ ЗСУ. – К.: ГШ ЗСУ, 2017.
7. Збірник тактичних розрахунків з прикладами: навч. посіб. / колектив авторів. – К. : НУОУ ім. Івана Черняхівського, 2018. – 96 с.
8. Дяченко Д. В. Розрахунок бойових можливостей ротної тактичної групи, що посилює бригаду територіальної оборони // Конференція: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health. – Харків : НТУ "ХПІ", 2022. – С. 1006
9. Коваленко С.П. Методика розрахунку ефективності прикриття наземних сил підрозділами ППО при веденні локальних конфліктів / С. П. Коваленко, А. Ф. Волков, С. І. Корсунов // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. - 2021. - Вип. 1. - С. 12-23. - URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpravs_2021
10. Абчук В.А., Матвійчук Ф.А. Довідник з дослідження операцій. URL: <https://violity.com/ua/114659156-dovidnik-z-doslidzhennya-operacij>
11. Оспіщев В.І., Пруненко Д.О.. Дослідження операцій. Навч. посібн (для студентів напрямку підготовки 0306 – «Менеджмент і адміністрування»). /За ред. В.І. Оспіщева – Харків: ХНАМГ, 2008. – 136 с. URL: <https://eprints.kname.edu.ua>
12. Кутковецький В.Я. Дослідження операцій: Навч. посібн. – Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. П. Могили, 2003. – 260 с. URL: <https://lib.chmnu.edu.ua/pdf/pidruchnuku/14/1.pdf>

REFERENCES:

1. Guidelines for personnel training in the Armed Forces of Ukraine. МКР 7-00(01).01. Main Department of Doctrine and Training of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine. K.: 2020, 52 p.
2. MP 7-(01,02,04)11.01. Methodical recommendations for the work of the staff officer of the tactical unit. The Department of Combat Training of the Command of the Armed Forces of the Armed Forces of Ukraine jointly with the National Academy of Sciences named after Hetman Pyotr Sahaidachny. K., 2019.
3. Methodological recommendations for the use of troops (forces) (to be taken into account during the acquisition of capabilities by troops (forces) to perform assigned tasks). General Staff of the Armed Forces of Ukraine. - K.: GS MFU, 2019.
4. Military manual of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine on the standards of conducting combat operations in the armed forces of NATO countries (VP 2.01.3; VP 3.21.20; VP 5.0A) / General Staff of the Armed Forces of Ukraine. - K.: GS MFU, 2017.
5. MP 7-01(11)56.01. Tactical training of a mechanized battalion. Method. manual The Center for Operational Standards and Training Methods of the Armed Forces together with the Main Department of Doctrine and Training of the General Staff of the Armed Forces. K.: State University of the MFU, 2021.
6. Military manual of the General Staff of the Armed Forces of Ukraine on the standards of conducting combat operations in the armed forces of NATO countries (VP 2.01.3; VP 3.21.20; VP 5.0A) / General Staff of the Armed Forces of Ukraine. - K.: GS MFU, 2017.

7. Collection of tactical calculations with examples: training. manual / team of authors. - K.: NUOU named after Ivan Chernyakhivskyi, 2018. – 96 p.

8. Dyachenko D. V. Calculation of the combat capabilities of a company tactical group that strengthens a territorial defense brigade // Information technologies: science, engineering, technology, education, health. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022. – P. 1006.

9. Kovalenko S.P. Methodology for calculating the effectiveness of covering ground forces by air defense units during local conflicts / S. P. Kovalenko, A. F. Volkov, S. I. Korsunov // Collection of scientific works of the National Academy of the National Guard of Ukraine. - 2021. - Issue 1. - P. 12-23. - URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpavs_2021

10. Abchuk V.A., Matviychuk F.A. Handbook of operations research. URL: <https://viility.com/ua/114659156-dovidnik-z-doslidzhennya-operacij>

11. V.I. Ospishchev, D.O. Prunencko. Operations research. Education manual (for students of training direction 0306 - "Management and administration"). /Editor's note V.I. Ospishcheva - Kharkiv: KhNAMG, 2008. - 136 p. URL: <https://eprints.kname.edu.ua>

12. Kutkovetsky V.Ya. Operations research: Training. manual - Mykolaiv: Department of the Moscow State University named after P. Mohyly, 2003. – 260 p. URL: <https://lib.chmnu.edu.ua/pdf/pidruchnuku/14/1.pdf>

Ph.D Zaitsev D.

THE WORK OF THE HEADQUARTERS REGARDING THE CALCULATION OF THE COMBAT CAPABILITIES OF THE MECHANISM UNIT AND THE METHOD OF DETERMINING THE PROBABILITY OF TARGET HIT BY MODERN MEANS OF UNMANNED AVIATION COMPLEXES

The article provides a variant of calculating the combat capabilities of a mechanized unit (compound), provided it is equipped with Western models of weapons and military equipment (OMT), taking into account the relevant coefficients of combat effectiveness.

It was determined that the S3 structural unit of the combined military headquarters is intended for the organization, coordination and implementation of battle planning (actions), training units, managing them during the conduct of battle (actions), as well as conducting tactical calculations and preparing and providing proposals to the commander for the development of action options, conducting their analysis and comparison, including for defeating armored targets and enemy manpower.

The defined initial data for calculating the duration of the headquarters' work on the spot are the actual distance of the control point (PU) from the units operating in front, the permissible distance of the PU according to the conditions of the situation, the time for folding and unfolding, the speed of movement of the units operating in front and the PU during its movement. giving. This allows you to calculate the time for the commander to make a decision and the time to work out directive documents (preliminary and combat orders, combat orders), which define the order of operations of the units and their combat tasks.

From the list of calculations carried out by the governing bodies, the article examines the combat capabilities of a mechanized unit (compound) to attack the ground enemy with the fire of tanks, infantry fighting vehicles, anti-tank weapons and small arms, including western samples.

The determined training combat potentials of the main types of weapons and military equipment allow you to calculate the potential combat capabilities of operational-tactical units and determine the effectiveness of the fire system as a component of the construction of a combined military battle (organization of tactical actions).

The given dependencies for determining the probability of hitting a target with any weapon for an independent and constant number of shots allow you to calculate: the potential capabilities of a unit (combination) to hit the enemy's air attack means, in particular, UAVs.

Keywords: combat capabilities, mechanized unit (compound), combat effectiveness coefficient, operational-tactical level headquarters, calculation and reference documents, probability of defeat, calculation method.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ АНАЛІЗУ РОЗВІДУВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Слово «таксономія» походить з грецького «таксіс», що означає упорядкування, поділ, або порядок, та «номос», що означає закон. Класичні приклади таксономії – це ієрархічна класифікація усіх живих організмів за системою Карла Ліннея на царства, типи, класи, ряди, родини, роди та види, яка широко використовується в біологічних науках, а також періодична таблиця елементів Дмитра Менделєєва, використовувана хіміками. Таксономія – це класифікація всіх елементів певної області інформації або знань. Вона визначає цю область, ідентифікуючи, називаючи і категоруючи всі різноманітні об'єкти в цій області. Об'єкти організовані в споріднені групи на основі якогось загального фактора, що притаманний кожному об'єкту у групі. У попередніх статтях ми визначили різницю між двома різними типами мислення, мисленням Системи 1 та Системи 2. Мислення Системи 1 є інтуїтивним, швидким, ефективним і часто бездумним. В даній роботі відмічається, що інтуїтивне мислення часто є точним, але воно також є загальним джерелом когнітивних упереджень та інших інтуїтивних помилок, які призводять до неправильного аналізу. Мислення Системи 2 є аналітичним. Воно повільне, обдумане і свідоме, результат розсудливого мислення. Крім структурованих аналітичних технік, мислення Системи 2 охоплює критичне мислення і весь спектр емпіричного та кількісного аналізу. Розвідувальні аналітики в основному покладаються на інтуїтивний суд, процес Системи 1, у побудові свого лінійного аналізу. Правильно виконане інтуїтивне розміркування іноді називається традиційним аналізом, поєднує експертизу з предметної області та основні навички мислення. Доказове мислення, історичний метод, метод кейс-стаді, та мислення за аналогією – це приклади цієї категорії аналізу. В роботі також відмічено, що основна характеристика, яка відрізняє інтуїтивне розміркування від структурованого аналізу, полягає в тому, що це зазвичай є індивідуальним зусиллям, в якому розуміння в основному залишається в розумі індивідуального аналітика, поки воно не буде записане у проект звіту. Навчання цього типу аналізу зазвичай здійснюється у вищих навчальних закладах, особливо у суспільних науках і гуманітарних науках, часто разом з певною експертизою в країні або мові. Мислення Системи 1 або інтуїтивні мислення суттєво відрізняється від мислення Системи 2, яка характеризується чотирма широкими категоріями аналітичних методів. Вона описує природу цих чотирьох категорій, однією з яких є структурований аналіз. Інші – це критичне мислення, емпіричний аналіз та квазікількісний аналіз.

Ключові слова: таксономія, інтуїтивне розміркування, аналіз, мислення за аналогією, експертиза країни, структуровані аналітичні техніки, спектр, емпіричний аналіз.

Вступ. Досвід провідних вчених аналітиків показує, що ведення розвідувальної інформаційної роботи неможливо без таксономії як класифікатора всіх елементів певної області інформації або знань. Звичайно, існують цінні таємниці, які має розкрити розвідка – речі, які можна знати та відкрити. Але цей світ також багатий на таємниці, пов'язані з майбутнім напрямком подій та намірами ключових акторів. Такі речі мало ймовірно освітлюються за допомогою одного лише шматка секретної розвідувальної інформації; це обов'язково теми для аналізу. Протягом останніх двадцяти років були зроблені важливі досягнення в психологічних дослідженнях щодо людського судження. Теорія подвійного процесу вибухла як переважний підхід, передбачаючи дві системи прийняття рішень, які називаються

Системою 1 та Системою 2. Основне відмінності між Системою 1 та Системою 2 полягає у інтуїтивному та аналітичному мисленні [1].

Система 1 є інтуїтивною, швидкою, ефективною і часто несвідомою. Вона природно використовує наявні знання, минулі досвіди і часто довгострокову ментальну модель того, як люди або речі працюють в конкретному середовищі. Мислення Системи 1 дуже спокусливе, оскільки воно потребує мало зусиль, і дозволяє людям швидко і ефективно вирішувати проблеми та приймати рішення.

Існує багато типів упереджень, всі з яких можна розглядати як когнітивні упередження, оскільки вони усі формуються та виявляються через діяльність Системи 1 у мозку. Потенційні причини упереджень включають професійний досвід, що призводить до засвоєння аналітичної ментальності, навчання або освіти, характер виховання, тип особистості, видимий особистий досвід або особистий інтерес у певному рішенні [2].

Усі упередження, крім, можливо, особистого упередження до особистих інтересів, є результатом швидкого, несвідомого та інтуїтивного мислення (Система 1), а не результатом обдуманого міркування (Система 2). Мислення Системи 1 зазвичай правильне, але часто впливають на аналіз та прийняття рішень в багатьох галузях, таких як психологія, політологія, медицина, економіка, бізнес та освіта. У цій роботі логічно описано багато упереджень, які впливають на розвідувальний аналіз. З тих пір сотні когнітивних упереджень були описані у науковій літературі за допомогою різних термінів. Когнітивні упередження подібні до оптичних ілюзій у тому, що помилка залишається переконливою навіть тоді, коли особа повністю усвідомлює її природу. Саме усвідомлення упередження не породжує більш точне сприйняття. Тому когнітивні упередження дуже важко подолати, тому, що люди більше помічають існування та функціонування когнітивних та мотиваційних упереджень у інших, ніж у самих себе. Це пояснює, чому так багато аналітиків вважають, що їх власне інтуїтивне мислення (Система 1) є достатнім [3].

Аналіз останніх досліджень. Аналіз публікацій в області таксономії як класифікатора всіх елементів певної області інформації або знань. Існує обширна література щодо когнітивних упереджень, іноді називаних «евристиками», яка пояснює, як вони впливають на мислення людини у багатьох галузях [1, 2]. Вони надають дороговказ для уникнення одного або декількох конкретних когнітивних упереджень, а також інших поширених інтуїтивних пасток описуються різноманітні помилки Системи 1, які призначені для уникнення цього виду структурованих аналітичних технік. Хоча ці техніки корисні, вони також не гарантують успіху. Питання інформаційно-аналітичної діяльності розглядається у таких публікаціях як: Варенко В. М. Інформаційно-аналітична діяльність: навчальний посібник; Процеси розвідувальної діяльності. Стандарт НАТО. Союзницька об'єднана настанова AJP-2.1 (видання В, варіант 1). Управління стандартизації НАТО. Але, на думку вчених сучасна техніка без спеціального програмного забезпечення не здатна задовольнити постійно зростаючі потреби підвищення ефективності розвідувальної діяльності. На думку військових вчених шлях вирішення даної проблеми є утворення спеціальних автоматизованих інформаційних систем (AIC). В залежності від предметної галузі, вони можуть дуже відрізнятися між «Психологія аналізу розвідки», вперше опублікована у 1999 році, застосовували уявлення Тверські та Канемана до проблем, з якими стикалися аналітики розвідки. З моменту публікації «Психології аналізу розвідки» інші автори, пов'язані з Розвідувальною спільнотою США (включаючи Джеффри Купера та Роба Джонстона), визначили когнітивні упередження як основну причину аналітичних невдач у ЦРУ [5-7].

Мета статті. В проведенні дослідження методологія аналізу розвідувальної інформації. Вона представляє таксономію з восьми відмінними категоріями структурованих аналітичних методів. Категорії базуються на тому, як кожен набір методів сприяє покращенню аналізу

розвідувальної інформації за допомогою яких внутрішні процеси розвідувальної інформаційної роботи відображаються зовні в систематичний та прозорий спосіб, щоб їх можна було спільно використовувати, розвивати та легко критикувати іншими. Кожна техніка залишає слід, за яким інші аналітики та керівники можуть слідкувати, щоб побачити основи структурованого аналітичного судження.

Виклад основного матеріалу. Протягом останніх років структуровані аналітичні техніки є техніками де-упередження. Вони не замінюють інтуїтивні судження. Їх роль полягає в тому, щоб піддавати сумнівам інтуїтивні судження, ідентифікуючи більший спектр варіантів для розгляду аналітиками. Наприклад, Ключові Припущення.

Перевірка передбачає ідентифікацію та розгляд додаткових припущень. Аналіз конкуруючих гіпотез передбачає ідентифікацію альтернативних гіпотез, акцент на спростуванні, а не підтвердженні гіпотез, та більш систематичний аналіз доказів. Усі структуровані техніки, описані у цій книзі, мають розділ «Додаткова вартість», що описує, як ця техніка сприяє поліпшенню аналізу та допомагає зменшити когнітивні упередження та інтуїтивні пастки, часто роблені розвідниками та пов'язані з мисленням Системи 1. Для багатьох технік користь є очевидною. Жодна з них не претендує на завжди правильну відповідь. Вони ідентифікують альтернативи, які заслуговують на серйозне розгляд. Звичайна критика структурованих аналітичних технік полягає в тому, що у мене немає достатньо часу, щоб їх використовувати [4]. Досвід багатьох аналітиків показує, що ця критика не має підстав. Багато технік забирають дуже мало часу. Будь-яка нова річ потребує часу на вивчення; але, одуже засвоєна, використання структурованих аналітичних технік заощаджує час аналітиків. Це може допомогти індивідуальним аналітикам працювати більш ефективно, особливо на початку проекту, коли аналітик може інакше трохи блукати, намагаючись зрозуміти, як продовжувати. Структуровані техніки полегшують групові процеси, покращуючи комунікацію, а також полегшують збір та інтерпретацію доказів. І, в кінцевому підсумку, структурована техніка створює продукт, в якому міркування за висновками є більш прозорим і більш легко приймається, ніж той, який отримано за допомогою інших методів. Це заощаджує час, швидко відзначаючи його рецензентами та редакторами та тим самим стискаючи процес координації. Аналітичні методи є важливими, але сам метод далекий від того, щоб гарантувати аналітичну точність або значення. Метод повинен бути поєднаний з субстантивною експертизою та допитливим розумом. І ці, у свою чергу, повинні підтримуватися і стимулюватися організаційним середовищем, в якому виконується аналіз [5].

Сучасне бачення майбутнього аналізу розвідки де він все більше стає спільним підприємством, зі зміною акценту від координації проектних продуктів до регулярного обговорення даних та гіпотез на ранніх етапах дослідження. Це є великою зміною по відношенню до традиційного аналізу як переважно індивідуальної діяльності, а координацію як останній етап процесу. У спільному підприємстві структуровані аналітичні техніки є процесом, через який відбувається співпраця. Так само, як ці техніки надають структуру нашим індивідуальним розумовим процесам, вони також можуть структурувати взаємодію аналітиків у малій команді або групі. Оскільки розумовий процес у цих техніках є прозорим, кожен крок у техніці спонукає до обговорення в команді. Таке обговорення може генерувати та оцінювати значно більше різноманітної і нової інформації, ніж група, яка не використовує структурований процес. Коли команда має справу з складною проблемою, синергія кількох розумів, які використовують структурований аналіз, зазвичай є ефективнішою, ніж думка одного аналітика [6]. Структуровані аналітичні техніки, коли вони поєднуються з програмним забезпеченням, також можуть надати каркас для керування агентурною співпрацею та координацією, з'єднуючи членів команди в різних офісах, агентствах, частинах перенасичених транспортними пробками

мегаполісів, навіть по всьому світу. Питання про те, чи розвідувальний аналіз є чи повинен бути мистецтвом або наукою, є одним з довгострокових спорів у літературі про розвідувальний аналіз. З нашої точки зору, розвідувальний аналіз має аспекти обох сфер. Діапазон діяльностей, що підпадають під поняття розвідувального аналізу, охоплює весь спектр когнітивних здібностей людини, і неможливо розподілити його лише на дві категорії – мистецтво та науку – або сказати, що він є лише одним чи іншим. В міру того, наскільки будь-яка частина розвідувального аналізу є мистецтвом чи наукою, це повністю залежить від того, як визначаються «мистецтво» та «наука». Розвідувальні аналітики використовують широкий спектр методів для роботи з ще ширшим спектром предметів. Хоча ця книга акцентується на області структурованого аналізу, важливо визначити певну початкову категоризацію всіх методів, щоб побачити, де вписується структурований аналіз. Багато дослідників говорять лише про два загальні підходи до аналізу, контрастуючи квалітативне з кількісним, інтуїтивне з емпіричним або інтуїтивне з науковим. Інші можуть стверджувати, що існують три відмінні підходи: інтуїтивний, структурований та науковий. У нашій таксономії ми намагалися вирішити цю плутанину, описуючи два типи мислення (Система 1 та Система 2) та визначаючи чотири категорії мислення Системи 2. Питання про те, чи розвідувальний аналіз є чи повинен бути мистецтвом або наукою, є одним з довгострокових спорів у літературі про розвідувальний аналіз. З нашої точки зору, розвідувальний аналіз має аспекти обох сфер [7]. Діапазон діяльностей, що підпадають під поняття розвідувального аналізу, охоплює весь спектр когнітивних здібностей людини, і неможливо розподілити його лише на дві категорії – мистецтво та науку – або сказати, що він є лише одним чи іншим. В міру того, наскільки будь-яка частина розвідувального аналізу є мистецтвом чи наукою, це повністю залежить від того, як визначаються «мистецтво» та «наука». Таксономія, описана тут, визначає чотири функціонально різних методологічних підходи до розвідувального аналізу. Ці підходи відрізняються характером використовуваних аналітичних методів, типом кількісних показників, якщо такі є, типом доступних даних і типом навчання, яке очікується або вимагається. Хоча кожен метод є відмінним, межі між ними можуть бути нечіткими. Методологія розвідки, яку виклав практик й методолог Джек Дейвіс, – це застосування процесів і цінностей наукового дослідження до специфічних умов стратегічної розвідки. Добрі критичні мислителі зупиняються й рефлексують, хто є основним замовником, яке є питання, де можна знайти найкращу інформацію, як можна переконливо аргументувати справу та що необхідно для ефективної передачі їх повідомлення. Вони розуміють, що цей процес передбачає перевірку ключових припущень, пошук даних, які спростовують ці припущення, і розгляд різних пояснень, наскільки це можливо. Структурований аналіз Структуровані аналітичні методи включають поетапний процес, який зовнішнім чином висвітлює мислення аналітика так, щоб його було легко розглянути іншими, тим самим дозволяючи його переглядати, обговорювати та критикувати крок за кроком. З цієї причини структурований аналіз зазвичай стає спільним зусиллям, в якому прозорість аналітичного процесу відкриває участь аналітиків на різні, конфліктні точки зору. Вважається, що цей тип аналізу пом'якшує деякі негативні наслідки когнітивних обмежень окремого аналітика, вбудованих уявлень та всього спектру когнітивних та інших аналітичних упереджень [8]. Часто використовуються техніки, такі як Структурований Брейнштормінг, аналіз сценаріїв, показники, аналіз конкуруючих гіпотез та перевірка ключових припущень. Структуровані техніки викладаються на рівні коледжу та аспірантури й можуть бути використані аналітиками, які не мають підготовки в статистиці, високій математиці або твердих науках. Квазі-кількісний аналіз за допомогою даних, що генеруються експертами: Аналітики часто не мають емпіричних даних, необхідних для аналізу розвідувальної проблеми. У відсутності емпіричних даних розробляються багато методів, які ґрунтуються на експертних оцінках

ключових змінних як Високий, Середній, Низький або Відсутній, або за допомогою присвоєння суб'єктивної ймовірності. Використовуються спеціальні процедури для збору цих оцінок, і зазвичай вони інтегруються в більший модель, що описує конкретне явище, таке як вразливість цивільного лідера перед військовим переворотом, рівень політичної нестабільності або ймовірний результат законодавчої дискусії [9]. До цієї категорії входять методи, такі як байєсівське виведення, динамічне моделювання та симуляція. Навчання використанню цих методів здійснюється на рівні аспірантури в таких галузях, як математика, інформаційні науки, операційний аналіз, бізнес або науки. Емпіричний аналіз з використанням кількісних даних: Кількісні емпіричні дані настільки відрізняються від даних, що генеруються експертами, що методи та типи проблем, які вони використовуються для аналізу, також дуже різні. Економетричне моделювання є одним із загальних прикладів цього методу. Емпіричні дані збираються різними типами датчиків і використовуються, наприклад, в аналізі. Одна з цих чотирьох методик не краща або ефективніша за іншу. Всі вони потрібні в різних обставинах, щоб оптимізувати ймовірність знаходження правильної відповіді. Використання кількох методів протягом одного аналітичного проекту має бути нормою, а не винятком. Наприклад, навіть дуже кількісний технічний аналіз може включати припущення про мотивацію, намір або здатність, які найкраще обробляються за допомогою підходів критичного мислення та/або структурованого аналізу [10]. Однією зі структурованих технік для генерації ідей може бути використання для ідентифікації змінних, які слід включити в динамічну модель, що використовує дані, створені експертами, для кількісної оцінки цих змінних. Із цих чотирьох методик структурований аналіз є новим «гравцем на полі», так би мовити, тому корисно розглянути, як він відноситься до мислення Системи 1. Мислення Системи 1 поєднує експертну експертизу та інтуїтивне розміркування в діяльності, яка відбувається переважно у голові аналітика. Хоча аналітик може отримувати ввід від інших, аналітичний продукт часто сприймається як продукт одного аналітика, і аналітик має тенденцію відчувати «власність» до свого аналітичного продукту. Робота одного аналітика особливо вразлива до широкого спектру когнітивних пасток, описаних у «Психології розвідувального аналізу» та в цій книзі [11]. Структурований аналіз слідує поетапному процесу, який може бути використаний окремим аналітиком, але він частіше використовується як груповий процес, оскільки саме так отримуються основні переваги. Як ми обговорювали у попередньому розділі, структуровані техніки керують діалогом між аналітиками з спільними інтересами, коли вони крок за кроком працюють над аналітичною проблемою. Критичним пунктом є те, що такий підхід викладає учасників з різними типами та рівнями експертизи на альтернативні ідеї, докази або ментальні моделі вже на ранніх етапах аналітичного процесу. Він може допомогти експертам уникнути деяких загальних когнітивних пасток. Структурований груповий процес, який ідентифікує та оцінює альтернативні перспективи, також може допомогти уникнути «групової думки», найбільш поширеної проблеми у групових процесах. Коли використовується групою чи командою, структуровані техніки можуть стати механізмом для обміну інформацією та групового навчання, яке допомагає компенсувати прогалини або слабкі сторони в експертній експертизі. Це особливо корисно для складних проектів, які вимагають синтезу кількох типів експертизи [12].

Висновки та напрямки подальших досліджень. Таким чином, в результаті дослідження методології аналізу розвідувальної інформації можна зробити висновок що, таксономія, описана тут, визначає чотири функціонально різних методологічних підходи до розвідувального аналізу. Ці підходи відрізняються характером використовуваних аналітичних методів, типом кількісних показників, якщо такі є, типом доступних даних і типом навчання, яке очікується або вимагається. Хоча кожен метод є відмінним, межі між ними можуть бути нечіткими. По перше це критичне мислення, як визначено досвідченими

спеціалістами. По дуге структурований аналіз Структуровані аналітичні методи включають поетапний процес, який зовнішнім чином висвітлює мислення аналітика. По третє квазі-кількісний аналіз за допомогою даних, що генеруються експертами: По четверте емпіричний аналіз з використанням кількісних даних. Одна з цих чотирьох методик не краща або ефективніша за іншу. Всі вони потрібні в різних обставинах, щоб оптимізувати ймовірність знаходження правильної відповіді. Використання кількох методів протягом одного аналітичного проекту має бути нормою, а не винятком. Наприклад, навіть дуже кількісний технічний аналіз може включати припущення про мотивацію, намір або здатність, які найкраще обробляються за допомогою підходів критичного мислення та/або структурованого аналізу. Однією зі структурованих технік для генерації ідей може бути використання для ідентифікації змінних, які слід включити в динамічну модель, що використовує дані, створені експертами, для кількісної оцінки цих змінних. Із цих чотирьох методик структурований аналіз є новим «гравцем на полі», так би мовити, тому корисно розглянути, як він відноситься до мислення Системи 1. Мислення Системи 1 поєднує експертну експертизу та інтуїтивне розсудження в діяльності, яка відбувається переважно у голові аналітика. Хоча аналітик може отримувати ввід від інших, аналітичний продукт часто сприймається як продукт одного аналітика, і аналітик має тенденцію відчувати «власність» до свого аналітичного продукту.

ЛІТЕРАТУРА:

1. "Ситуація бентежна": у ГУР назвали єдиний безпечний варіант для росіян в Криму. Анжеліка Байбак 17:29, 27 вересня 2023 р. https://24tv.ua/chornomorskiy-flot-sevastopoli-vibuh-rozvidtsi-dali-poradu-rosiyanam_n2400724
2. Левченко О. В., Вінник В. В., Устименко О. В. Розвідка та іноземні армії. Інформаційна робота : навчальний посібник / — Київ: «КНТ», 2022. — 124 с.
3. bintel.org.ua/nukma/rozviduvalnij-proces-nato/
4. <https://www.nato.int/docu/review>
5. Військовий стандарт 01.101.004. Видання 2. Воєнна розвідка. Розвідувально-інформаційна діяльність. Терміни та визначення. — К. : Міністерство оборони України, 2015. — 26 с.
6. Процеси розвідувальної діяльності. Стандарт НАТО. Союзна об'єднана настанова АJP-2.1 (видання В, варіант 1)/ Управління стандартизації НАТО, 2016. — 80 с.
7. Сайт Принципів Прогнозування: : www.forecastingprinciples.com/files/pdf/methodselectionchart.pdf.
8. Рассел У. Френске, «Таксономия для операционных исследований», Операционные исследования 19, № 1 (январь-февраль 1971).
9. Кай Р. Т. Ларсон, «Таксономия предпосылок успеха информационных систем: исследования переменных анализа», Журнал менеджмента информационных систем 20, № 2 (осень 2003).
10. Основи розвідувально-інформаційної діяльності: настанова Штабу розвідки Міністерства оборони Великобританії. — К. : ГУР МО України, 2015.— 51 с.
11. [/defpol.org.ua/index.php/produkty-tsentru/49-shliakh-ukrainy-do-nato/1084](https://defpol.org.ua/index.php/produkty-tsentru/49-shliakh-ukrainy-do-nato/1084)
12. Методичні рекомендації з розробки розвідувальних оцінок (за стандартами провідних країн-членів НАТО). — К. : ГУР МО України, 2018. — 118 с.

REFERENCES:

1. "The situation is embarrassing": the State Government named the only safe option for Russians in Crimea. Anzhelika Baybak 17:29, September 27, 2023 https://24tv.ua/chornomorskiy-flot-sevastopoli-vibuh-rozvidtsi-dali-poradu-rosiyanam_n2400724
2. Levchenko O. V., Vinnyk V. V., Ustymenko O. V. Intelligence and foreign armies. Information work: study guide / — Kyiv: "KNT", 2022. — 124 p.
3. bintel.org.ua/nukma/rozviduvalnij-proces-nato/
4. <https://www.nato.int/docu/review>

5. Military standard 01.101.004. Edition 2. Military intelligence. Intelligence and information activities. Terms and definitions. - K.: Ministry of Defense of Ukraine, 2015. - 26 p.
6. Intelligence activity processes. NATO standard. Allied Joint Instruction AJP-2.1 (edition B, version 1)/ NATO Standardization Office, 2016. – 80 p.
7. Forecasting Principles website: www.forecastingprinciples.com/files/pdf/methodsselectionchart.pdf.
8. Russell W. Franske, "Taxonomy for Operational Research," Operational Research 19, No. 1 (January-February 1971).
9. Kai R. T. Larson, "Taxonomy of prerequisites for the success of information systems: research on variable analysis", Journal of Management of Information Systems 20, No. 2 (autumn 2003).
10. Basics of intelligence and information activities: instruction of the Intelligence Staff of the Ministry of Defense of Great Britain. – K.: GUR Ministry of Defense of Ukraine, 2015. – 51 p.
11. [/defpol.org.ua/index.php/produkty-tsentru/49-shliakh-ukrainy-do-nato/1084](http://defpol.org.ua/index.php/produkty-tsentru/49-shliakh-ukrainy-do-nato/1084)
12. Methodological recommendations for the development of intelligence assessments (according to the standards of leading NATO member countries). - K.: GUR Ministry of Defense of Ukraine, 2018. - 118 p.

Ph.D. Mamich V.V., Ph.D. Maksimenko Yu.A.,
Ph.D. Didyk V.O., Sharshatkin D.Y., Dushkin Yu. G.

RESEARCH OF INTELLIGENCE INFORMATION ANALYSIS METHODOLOGY

The word "taxonomy" comes from the Greek "taxis" meaning arrangement, division, or order, and "nomos" meaning law. Classic examples of taxonomy are the hierarchical classification of all living organisms according to Carl Linnaeus' system into kingdoms, types, classes, orders, families, genera, and species, which is widely used in the biological sciences, as well as in Dmytro Medeleev's periodic table of elements, which is used by chemists. Taxonomy is a classification of all elements of a certain area of information or knowledge. It defines that area by identifying, naming, and categorizing all the various objects in that area. Objects are organized into related groups based on some common factor inherent to each object in the group. System 1 thinking is intuitive, fast, efficient, and often thoughtless. This paper notes that intuition is often accurate, but it is also a common source of cognitive biases and other intuitive errors that lead to incorrect analysis. System 2 thinking is analytical. It is slow, considered and conscious, the result of judicious thinking. In addition to structured analytical techniques, System 2 thinking encompasses critical thinking and the full range of empirical and quantitative analysis. System 2 thinking is analytical. It is slow, considered and conscious, the result of judicious thinking. In addition to structured analytical techniques, System 2 thinking encompasses critical thinking and the full range of empirical and quantitative analysis. Exploratory analysts rely primarily on intuitive judgment, a System 1 process, in constructing their linear analysis. Intuitive reasoning done right, sometimes called traditional analysis, combines domain expertise with basic thinking skills. Evidential thinking, the historical method, the case study method, and thinking by analogy are examples of this category of analysis. The paper also notes that the main characteristic that distinguishes intuitive thinking from structured analysis is that it is usually an individual effort in which the understanding remains largely in the mind of the individual analyst until it is written down in a draft report. This type of analysis is usually taught in higher education, especially in the social sciences and humanities, often with some expertise in a country or language. System 1 thinking, or intuitive thinking, differs significantly from System 2 thinking, which is characterized by four broad categories of analytical methods. She describes the nature of these four categories, one of which is structured analysis. Others are critical thinking, empirical analysis, and quasi-quantitative analysis.

Key words: taxonomy, intuitive reasoning, analysis, thinking by analogy, country expertise, structured analytical techniques, spectrum, empirical analysis.

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ НЕЧІТКОЇ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМ ОБ'ЄКТОМ

Відомо, що багато складних суднових об'єктів, зокрема, парогенеруючі об'єкти, мають нелінійні характеристики, складні для моделювання динамічні елементи, неконтрольовані шуми і перешкоди, безліч зворотних і перехресних зв'язків та інші фактори, що ускладнюють реалізацію оптимальних систем автоматичного управління (САУ). За останні два десятиліття нові методи управління розвивалися на основі сучасної та класичної теорій управління. Як сучасна (зокрема, технології адаптивного і оптимального управління), так і класична теорія управління в значній мірі ґрунтувалися на ідеї лінеаризації систем. Однак, практично прийнятними до впровадження без подальшої адаптації можуть бути тільки об'єкти з лінійними параметрами і з низькою чутливістю до зовнішніх і внутрішніх збурень. Забезпечити цю якість для нелінійних суднових об'єктів, які працюють в складних специфічних і часто несприятливих навігаційних умовах і на різних режимах в широкому діапазоні парового навантаження, розробникам, що використовують традиційні методи проектування САУ, досить складно, а з урахуванням всіх факторів і неможливо.

Через зазначені недоліки традиційних суднових САУ, для підвищення їх ефективності при роботі в специфічних умовах, стає актуальним використання симбіозу традиційних і нових інтелектуальних технологій на основі апарату нечітких або нейро-нечітких систем, які успішно зарекомендували себе при роботі з промисловими складними об'єктами. В роботі запропонована методика синтезу нечіткої адаптивної САУ складним судновим об'єктом (паровим котлом), якій працює тривалий час зі зміною парового навантаження. Проведено моделювання запропонованої системи для трьох режимів роботи суднового об'єкта та проведено оцінку показників якості адаптивної САУ.

Ключові слова: методика, синтез, система адаптивного управління, нечітка логіка, складний об'єкт.

Вступ та постановка проблеми. З початком 80-х років минулого століття в САУ починають експерименти з впровадження методів адаптивного управління, що використовують автоматичне налаштування параметрів регуляторів [1].

У таких системах повністю автоматичне налаштування може ініціюватися при настанні заздалегідь заданої умови, наприклад, при зміні навантаження, зміні зовнішніх впливів, зміні похибки регулювання, або безперервно в часі. Автоматичне налаштування, яке ініціюється без участі людини, називається адаптацією. Різновидом адаптації є розімкнене керування параметрами регулятора (табличне автоналаштування), коли заздалегідь знайдені параметри регулятора для різних умов роботи системи заносяться в таблицю, з якої вони витягуються при настанні умов, за якими ініціюється адаптація.

До недавнього часу вважалося, що регулятори, налаштовані в автоматичному режимі, зазвичай працюють менш ефективно, ніж ті, що налаштовані вручну. Пояснювалося це тим, що комп'ютер не може виконувати складні і погано формалізовані завдання краще за людину. Однак з розвитком методів теорії штучного інтелекту, особливо теорії нечіткої логіки, ситуація кардинально змінилася. Нечітка логіка дозволяє описувати знання та досвід експертів у галузі налагодження САУ та успішно застосовувати його на практиці у вигляді експертних систем. Отже, впровадження математичного апарату теорії нечіткої логіки в системи адаптивного управління складними судновими установками є актуальним науково-прикладним завданням.

Відомо, що суднові парові котли, як об'єкти управління, відрізняються широким різноманіттям за своїми конструктивними характеристиками і режимними параметрами, працюють в мінливих умовах навігаційної обстановки і зміні режимів роботи. Парове навантаження СПК в тривалих експлуатаційних режимах (стоянка с вантажними операціями, ходовий) знаходиться в межах 10 – 90 % від номінальної, а в режимах (швартування, аварійний режим, зйомка з якоря) може бути зменшене до 20 – 40 % від номінального. Також, на парове навантаження СПК впливає характер поточних технологічних процесів на судні, інтенсивність роботи силової установки, швидкість судна, район плавання та пора року і т.д. [2-4].

Відповідно, з урахуванням вищевикладеного, задача по розробці систем управління для СПК як об'єкту управління є складною і трудомісткою.

Таким чином, дослідження ефективності застосування методів теорії нечіткої логіки для адаптації судових САУ на прикладі параметрів судового парового котла є актуальним науково-прикладним завданням.

Аналіз останніх розробок і публікацій. В даний час є близько півсотні комерційних продуктів для налаштування ПД-регуляторів. У тому числі - Protuner фірми Techmation Inc., LabVIEW PID Control Toolset фірми National Instruments, Intelligent Tuner (Fisher-Rosemount), Profit PID (Honeywell) та інших [5, 6].

Переважає більшість програм використовує модель першого порядку із затримкою для опису об'єкта регулювання. Зв'язок з обладнанням виконується за допомогою OPC сервера SCADA.

У останніх версіях контролерів АВВ після ідентифікації в режимі релейного регулювання використовується додатковий етап ідентифікації за реакцією об'єкта на вхідний стрибок. У багатьох зарубіжних контролерах застосовується принцип табличного адаптивного управління, який використовується практично у всіх промислових контролерах інших виробників.

Дані для введення в таблицю отримуються шляхом виконання процедури автоналаштування для необхідних режимів роботи об'єкта.

Методи адаптації ПД-регуляторів, що описані вище, мають не оптимальні показники якості при керуванні нелінійними та складними системами, за недостатньої інформації про об'єкт управління або в разі неможливості проведення активної ідентифікації через умови виробництва. Характеристики типових регуляторів у таких випадках можна покращити за допомогою методів нечіткої логіки. Нечітке управління, як правило, застосовується для складних об'єктів, що функціонують в умовах невизначеності. Такі об'єкти піддаються частим змінам збурюючих впливів, що ускладнює ефективність традиційних алгоритмів, але при цьому досить успішно керуються досвідченими операторами в режимі дистанційного управління. Для розробки нечіткої системи адаптивного управління автори пропонують методику синтезу нечіткої адаптивної САУ, яка складається з етапів, представлених нижче.

Розробка математичної моделі контуру управління за допомогою методів параметричної ідентифікації у програмі System Identification Toolbox. Під час роботи у програмі було виконано наступні етапи процесу параметричної ідентифікації (рис. 1 - 9):

На певному етапі було здійснено введення експериментальних даних та побудовано графіки експериментальних залежностей (рис.1 – 3).

Завдання параметричної ідентифікації зводиться до пошуку таких значень параметрів моделі, які забезпечують найбільшу близькість значень на виході, розрахованих за моделлю та отриманих в експерименті, при однаковому значенні вхідних даних.

Як критерій оцінки моделі або її точності використовується середньоквадратичне відхилення.

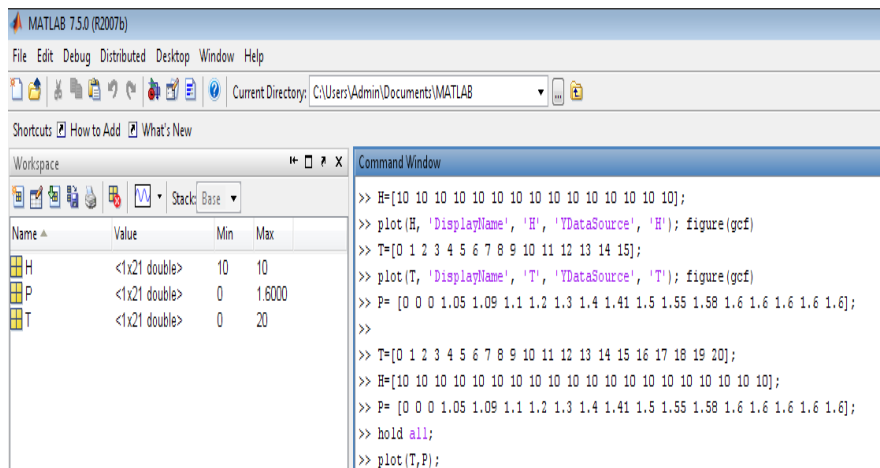


Рисунок 1 – Програма для введення вихідних даних за допомогою командного рядка (година, тиск, положення паливного клапана)

Експериментальна крива розгону показана на рис. 2.

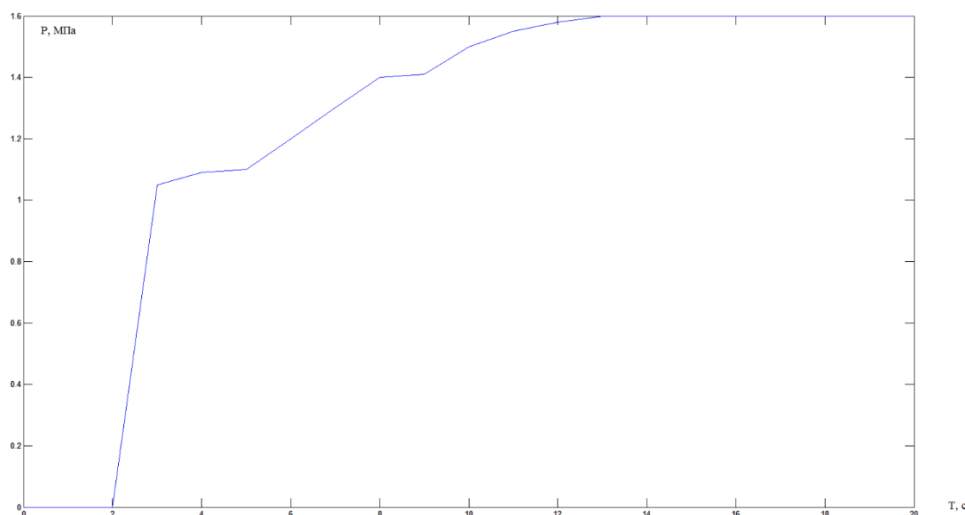


Рисунок 2 – Експериментальна крива розгону тиску пари суднового парового котла Mitsubishi MAC 60 при номінальному паровому навантаженні

Графічна залежність положення паливного клапана представлена на рис.3.

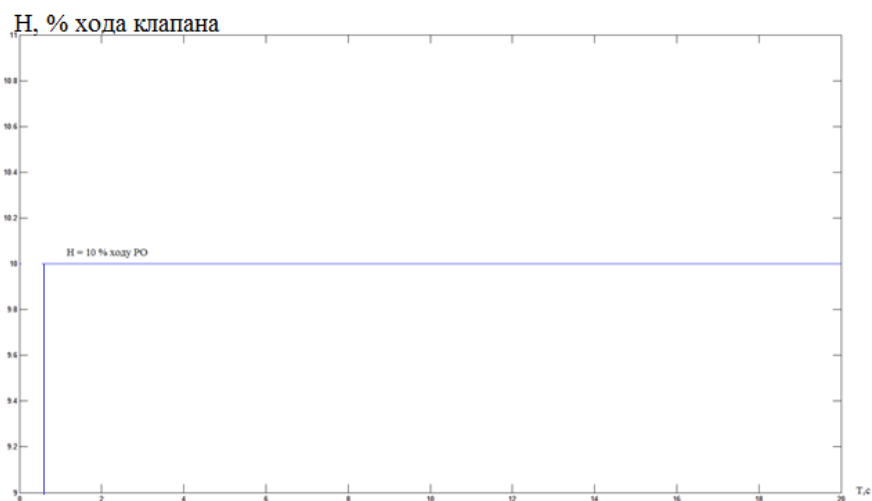


Рисунок 3 – Графік положення регулюючого органу (клапану)

Процес завантаження експериментальних даних представлений на рис. 4.

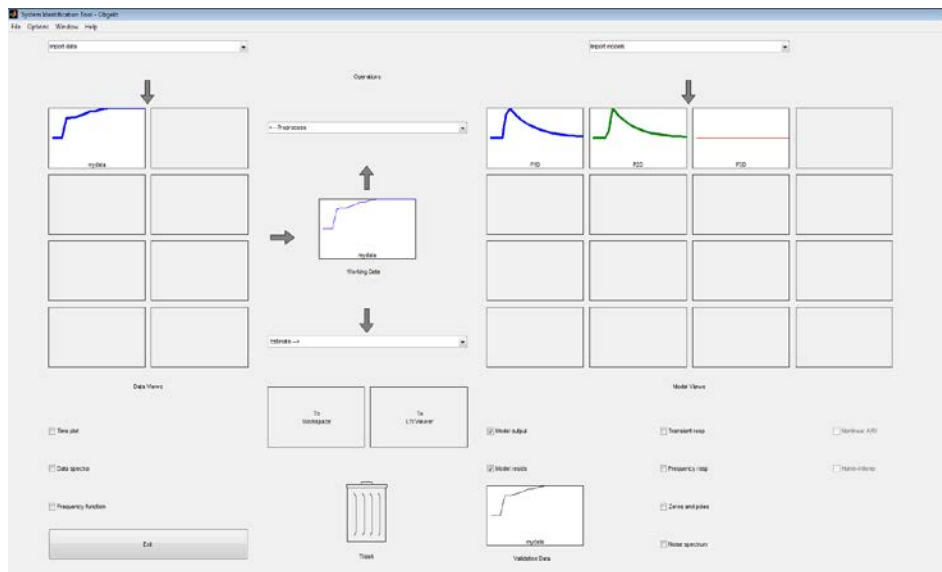


Рисунок 4 – Процес завантаження експериментальних даних у програму параметричної ідентифікації

Процеси розрахунку значень параметрів моделі першого порядку та порівняльні характеристики експериментальних та модельних даних показані на рис. 5 – 7.

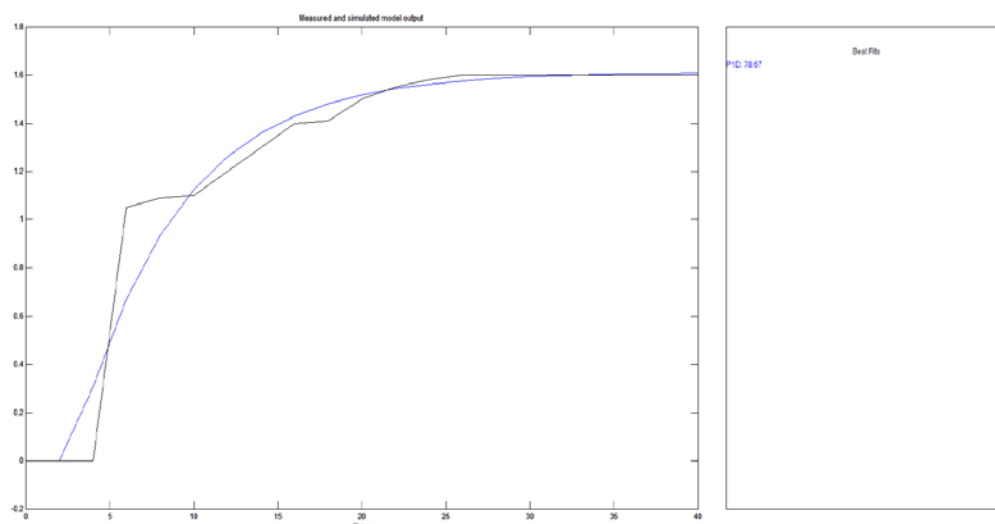


Рисунок 5 – Порівняльний аналіз даних експерименту і моделі (ступінь адекватності моделі = 78 %)

Значення математичної моделі (передавальної функції інерційної ланки першого порядку зі ланкою запізнення) показано на рис. 6.

```

Process model with transfer function
      K
G(s) = ---- * exp(-Td*s)
      1+Tp1*s
with  K = 0.16113
      Tp1 = 6.0812
      Td = 3.3345
Estimated using PEM from data set mydata
Loss function 0.0150315 and FPE 0.020042

```

Рисунок 6 – Розраховані значення математичної моделі

Перегляд значень авторегресії та середньоквадратичного відхилення можна побачити на (рис.7).

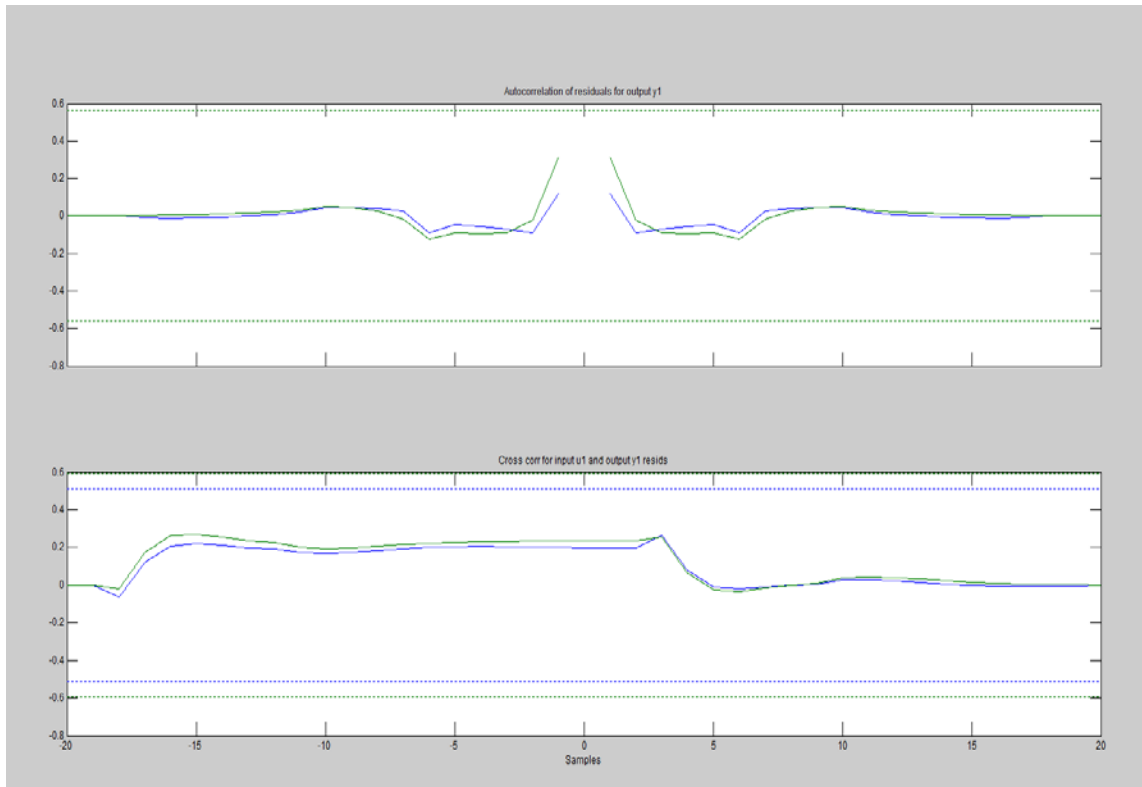


Рисунок 7 – Квадратичні відхилення модельних даних від експериментальних

Для аналізу можливості підвищення ступеню точності моделі проводився другий експеримент на вибір порядку моделі. Розрахункові дані (математична модель) показані на рис. 8.

```

Process model with transfer function
      K
G(s) = ---- * exp(-Td*s)
      (1+Tp1*s)(1+Tp2*s)
with  K = 0.16
      Tp1 = 5.4866
      Tp2 = 0.001
      Td = 3.8119
Estimated using PEM from data set mydata
Loss function 0.0164434 and FPE 0.0241814

```

Рисунок 8 – Розрахункові значення передавальної функції інерційної ланки другого порядку з ланкою запізнення

Порівняльний аналіз показника адекватності (точність моделі) за двома моделями та експериментом показаний на рис.9.

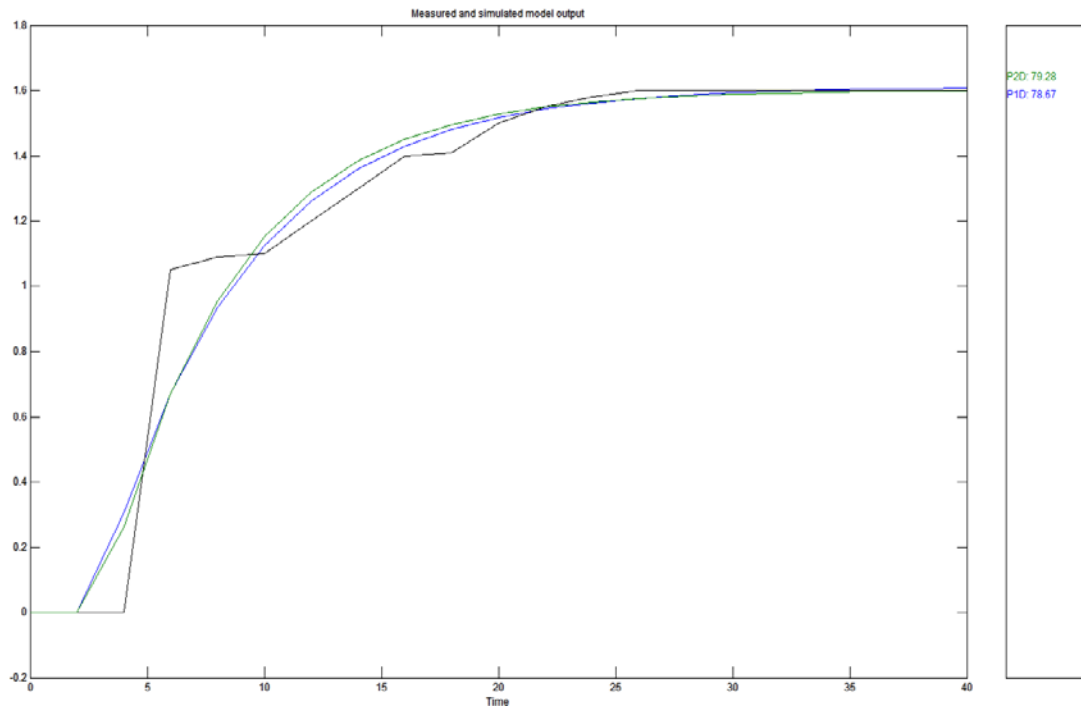


Рисунок 9 – Графічні залежності, що відображають експериментальні дані за допомогою запропонованих математичних моделей.
(Ступінь адекватності моделі другого порядку 80%.)

Модель третього порядку виявилася зі значенням точності 70%, тобто гірше. Таким чином, на підставі порівняльного аналізу було обрано математичну модель другого порядку у вигляді інерційної ланки з ланкою запізнення. Модель добре відображає експеримент і може бути використана для подальших розрахунків параметрів ПД – регуляторів у САУ тиску пари судових котлів.

Вибір структури та алгоритму нечіткої системи адаптації параметрів ПД – регулятора. Як структуру адаптивного САУ запропонована система нечіткої адаптації ПД – регулятора (рис.10) [7]. На вхід нечіткого адаптера (нечіткої експертної системи, що діє за алгоритмом Мамдані) подаються параметри математичної моделі об'єкта, а вихідними даними є оптимальні налаштування ПД - регулятора. Налаштування параметрів регулювання може бути автоматичним, за допомогою блоку нечіткої логіки Блок нечіткої логіки (фаззі-блок) використовує базу правил налаштування та методи нечіткого виведення. Фаззі-налаштування дозволяє зменшити перерегулювання, знизити час встановлення та підвищити робастність ПД-регулятора. Процес автоналаштування регулятора за допомогою блоку нечіткої логіки починається з пошуку початкових наближень коефіцієнтів регулятора. Це робиться шляхом Циглера-Нікольса, з періоду своїх коливань у замкнутій системі і петльового посилення. Далі формується критеріальна функція, необхідна для пошуку оптимальних значень параметрів налаштування методами оптимізації [7].

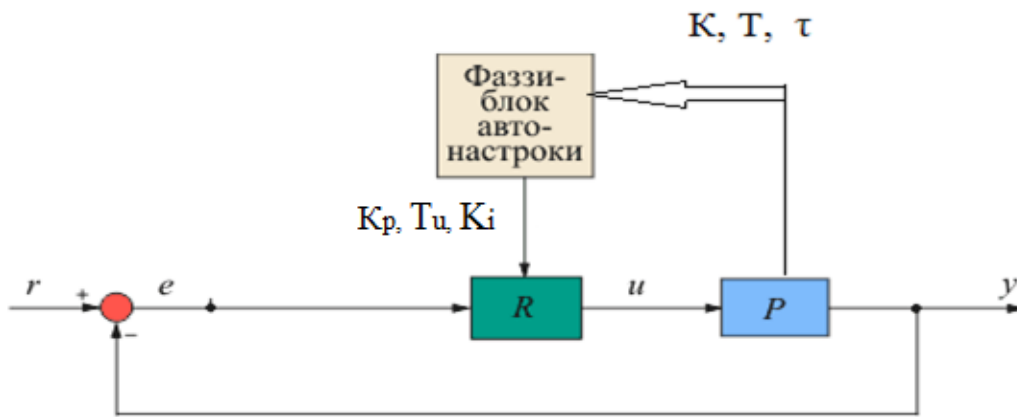


Рисунок 10 - Структура ПД-регулятора з блоком автоналаштування на основі нечіткої логіки: R – ПД – регулятор, P – об'єкт управління

Автоналаштування ПД-регулятора дозволяє автоматизувати процес вибору оптимальних параметрів, щоб забезпечити стабільну роботу системи за зміни зовнішніх умов або характеристик об'єкта управління.

Етап створення нечіткої адаптивної системи в редакторі Fuzzy Logic Toolbox.

Спочатку обирають діапазони вхідних та вихідних сигналів блоку автоналаштування, форму функцій належності шуканих параметрів, правила нечіткого виведення, механізм логічного виведення, метод дефазифікації та діапазони масштабних множників, необхідних для перерахування чітких змінних у нечіткі. Параметри моделі обираються з урахуванням даних спостережень які були отримані на попередньому етапі.

Вхідні дані – параметри математичної моделі (передавальної функції з ланкою затримки), які знаходяться у діапазоні в залежності від навантаження складного об'єкта: K – коефіцієнт посилення (0.3 – 1.5); T – постійна часу (1 – 10); T_{au} – запізнення (0.1 – 1).

Виходи адаптивного налаштування ПД – регулятора: K_p – коефіцієнт пропорційності; K_i – коефіцієнт диференціювання; T_u – постійна інтегрування (рис.11).

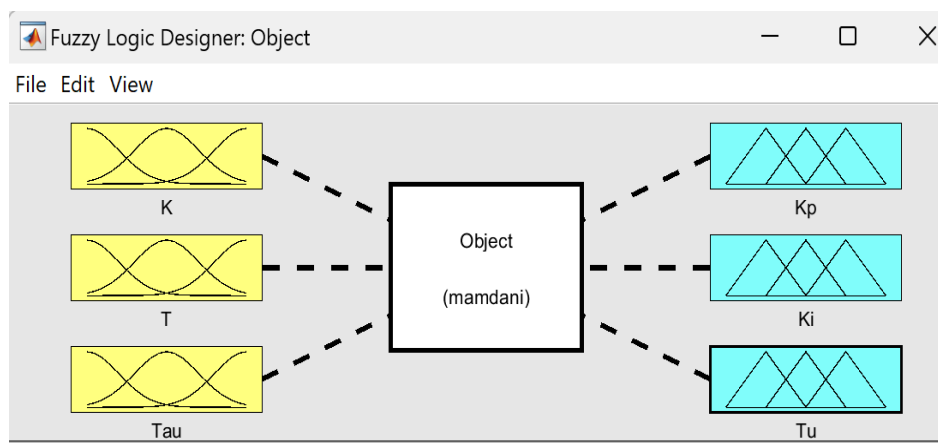


Рисунок 11 – Редактор налаштування вхідних та вихідних параметрів нечіткої адаптивної САУ у середовищі Fuzzy Logic Toolbox

Після створення загальної структури у редакторі «Membership Function» здійснюють введення значень необхідних параметрів та типу функції належності (рис.12 - 13).

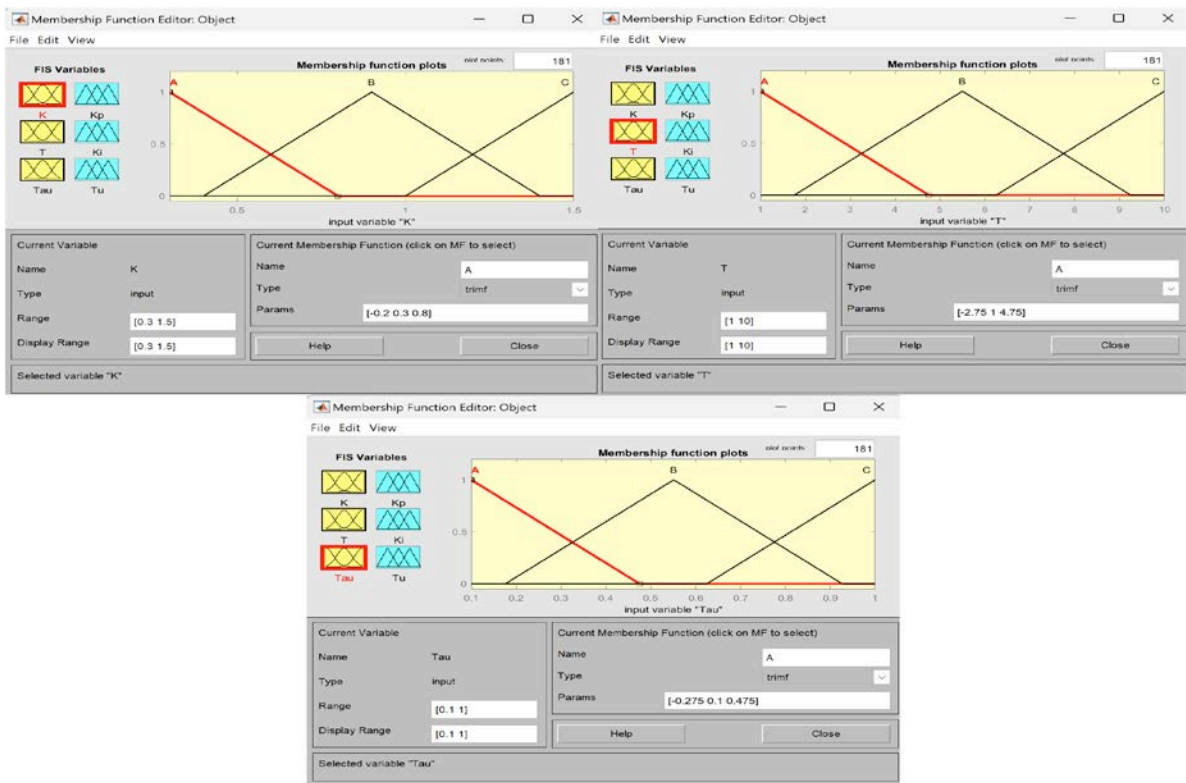


Рисунок 12 – Функції належності вхідних змінних K , T , T_{au}

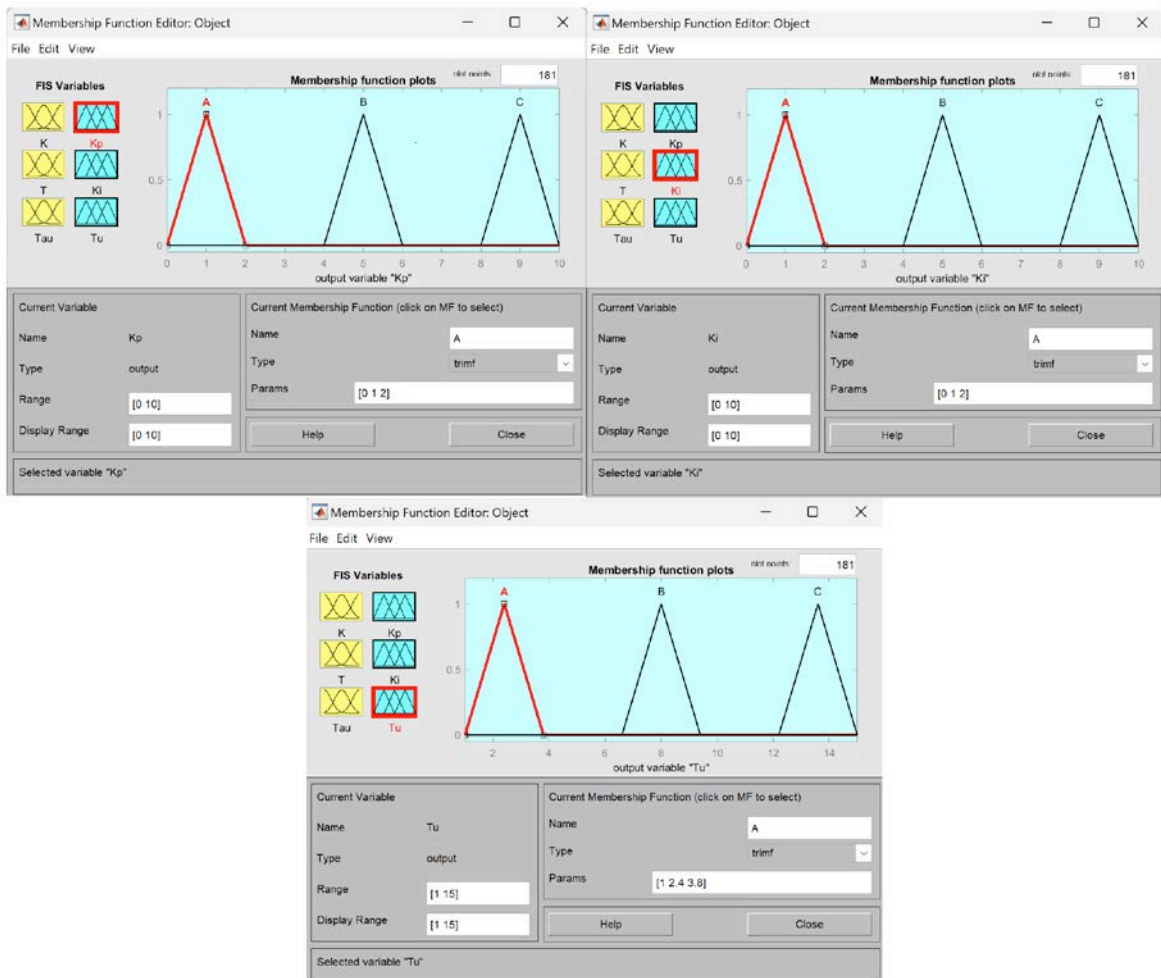


Рисунок 13 – Функції належності вихідних змінних K_p , K_i , T_u

Далі процес розробки правил роботи бази знань на основі досвіду експерта по ручному налаштуванню контролерів САУ. Для цього використовується меню «Rule Editor» (рис.14)

Деякі правила за якими буде працювати експертна адаптивна система:

- 1) Якщо (K , T , $T_{au} = A$) тоді ($K_p = C$)($K_i = A$)($T_u = B$);
- 2) Якщо (K , T , $T_{au} = B$) тоді ($K_p = A$)($K_i = B$)($T_u = C$);
- 3) Якщо (K , T , $T_{au} = C$) тоді ($K_p = C$)($K_i = A$)($T_u = B$).

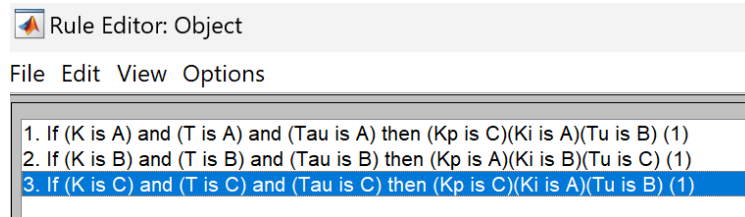


Рисунок 14 – Фрагмент правил за якими працює нечітка адаптивна система

Приклад роботи програми продемонстровано на (рис. 15 - 16). Для відображення залежності вихідної змінної від вхідних можна отримати поверхню відгуку при відповідному виборі меню, також при цьому можна задати параметр відображення.

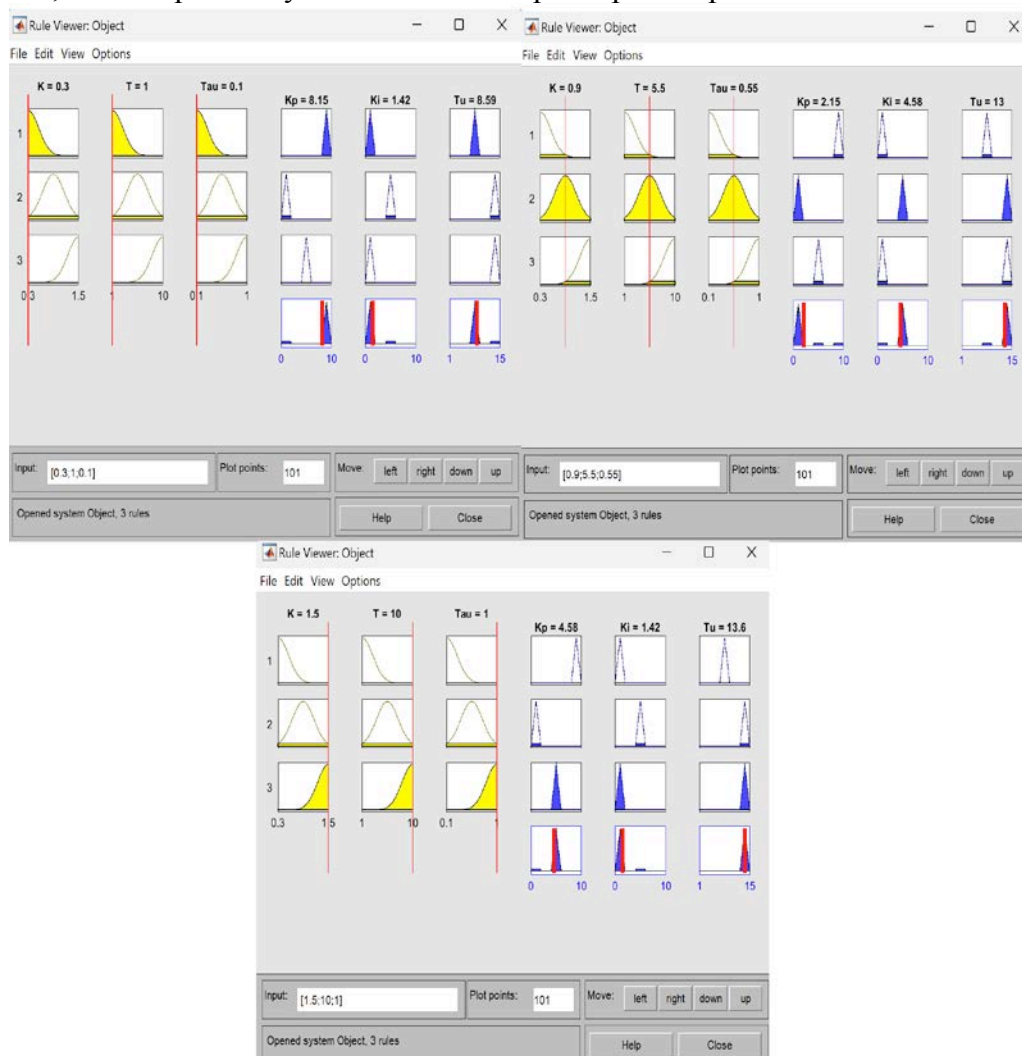


Рисунок 15 – Принцип роботи програми при (мінімальних, середніх, максимальних) вхідних параметрах та відповідно отримані оптимальні налаштування

ПІД – регулятора САУ тиску пари

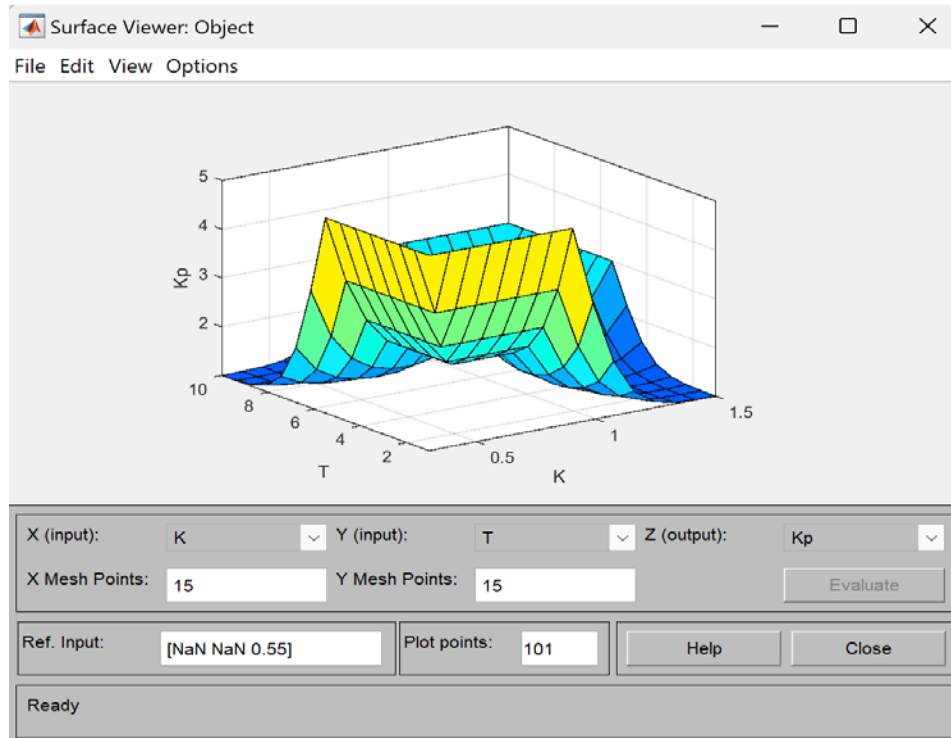


Рисунок 16 – Поверхня відгуку нечіткої системи

Моделювання нечіткої адаптивної системи у програмі SimuLink. За допомогою редактора Simulink промодельовано поведінку системи з ПІД-регулятором і перевіримо, як змінюється перехідний процес при різних математичних моделях.

У моделі САУ (рис. 17) використані наступні елементи:

- Task: завдання чи вхідна величина.
- Суматор: блок підсумовування, де обчислюється помилка як різниця між вхідним сигналом та виходом системи.
- Controller: пропорційно-інтегрально-диференціальний (PID) контролер, який керує сигналом регулювання.
- Valve/Drive: підсилювальний блок (може представляти привід або клапан).
- Object: об'єкт управління з функцією передавання
- Delay: блок затримки.
- Out: вихід системи (сигнал на виході).

Елементи об'єднані в систему із зворотним зв'язком, де вихід впливає на роботу PID контролера через суматор.



Рисунок 17 – Загальна модель системи управління у програмі Simulink (MatLab)

Вхідні параметри передавальних функцій, які відображають три навантажувальних режими роботи суднового парового котла (мінімальний, середній, максимальний):

- Мінімальні: $K = 0.3$, $T = 1$, $T_{au} = 0.1$;

- Середні: $K = 0.9$, $T = 5$, $T_{au} = 0.5$;
- Максимальні: $K = 1.5$, $T = 10$, $T_{au} = 1$;

Перехідні процеси адаптивної САУ показано на рис. 18.

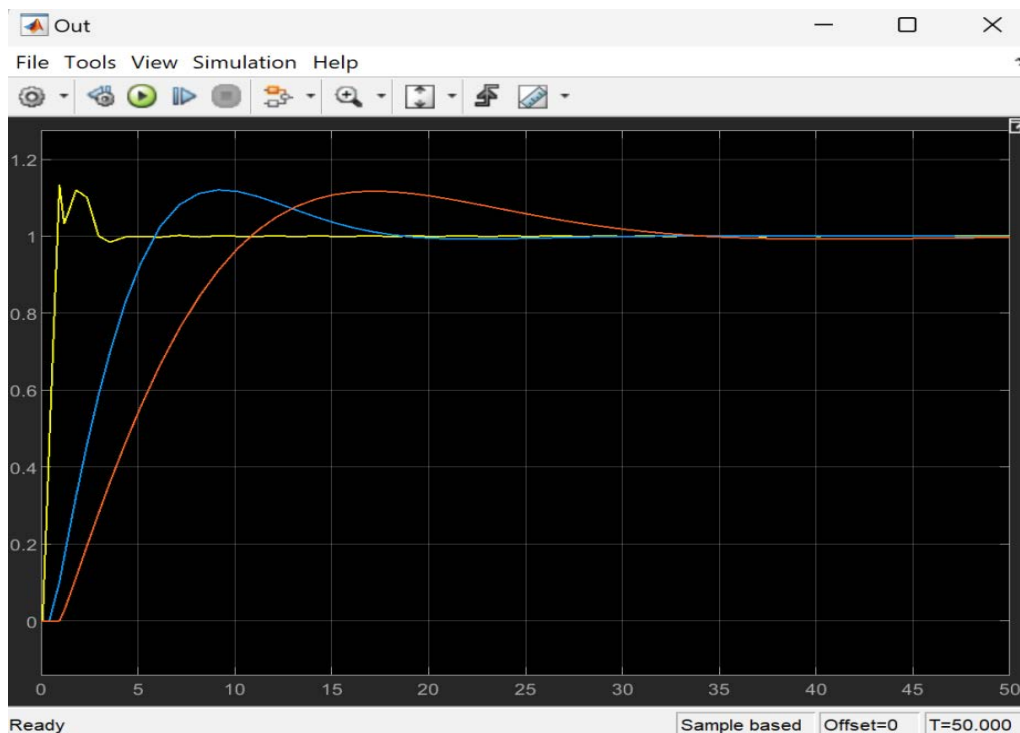


Рисунок 18 – Перехідні процеси трьох режимів роботи суднового об'єкта управління по каналу завдання після нечіткого адаптивного налаштування ПІД - регулятора

Аналіз показників якості перехідних процесів адаптивної САУ (рис.18) показав бажаний аперіодичний тип, відсутність помилки регулювання та регламентований час регулювання. Таким чином, запропонована методика успішно реалізує ефективну адаптацію суднової САУ.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Адаптація ПІД - регуляторів за допомогою нечітких експертних систем виключає необхідність ручного налаштування, що не тільки заощаджує час, а й мінімізує людські помилки, які можуть виникнути при спробах налаштування системи вручну. Це особливо критично у промислових процесах, де неправильне налаштування може призвести до суттєвих втрат або збоїв у роботі обладнання.

У разі ПІД -регуляторів нечітка логіка може використовуватися для:

- аналізу показників якості перехідних процесів та їх змін;
- прийнятті рішень про коригування коефіцієнтів регулятора залежно від стану системи управління;
- автоматичної адаптації та оптимізації параметрів регулятора в режимі реального часу при зміні динаміки системи.

Переваги експертних систем автоналаштування:

- адаптивність: експертна система може адаптуватися до змін умов роботи системи без необхідності втручання оператора;
- гнучкість: використання нечіткої логіки дозволяє гнучкіше реагувати на зміни параметрів об'єкта керування в умовах невизначеності та наявності досвіду експерта;
- оптимізація якості управління: автоматичне налаштування ПІД - регулятора знижує статичну помилку, підвищує стійкість та точність системи.

Таким чином, впровадження нечітких адаптивних САУ у технологічні процеси складних об'єктів, на приклади суднових теплових агрегатів може суттєво покращити показники якості перехідних процесів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Åström, K.J., Wittenmark, B. Computer controlled systems, theory and design. Prentice-Hall, Englewood Cliffs [Електроний ресурс] 2018. Режим доступу: <https://bayanbox.ir/view/8821671619590593184/Adaptive-Control-Astrom-2nd-edition.pdf>.
2. Mikhaïlenko, V.S., Kharchenko, R. Yu. Analysis of traditional and neuro-fuzzy adaptive system of controlling the primary steam temperature in the direct flow steam generators in TPS / Automatic Control and Computer Sciences, 2014, Vol. 48, No. 6, pp. 334–344. doi: 10.3103/S0146411614060066.
3. Mikhaïlenko, V.S., Kharchenko, R.Yu., Shcherbinin, V.A., Leshchenko, V.V. Using Neural Network Technologies to Simulate the Working Processes of Ship Steam Boilers. Information Resources CEUR Workshop Proceedings [this link is disabled](#), urn:nbn:de:0074-3126-7, 2021, 3126, pp. 367–373.
4. Li, Y., Ang, K.H., Chong, G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art / IEEE Control Systems Magazine. 2006. 142 p.
5. Kharchenko, R. Y., Kochetkov, A. V., Mikhaïlenko, V. S. ANALYSIS OF METHODS FOR AUTOMATED RESEARCH OF DC VOLTAGE CONVERTERS OF MODULAR STRUCTURE / Radio Electronics, Computer Science, Control. 2022. (3), 7. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-3-1>.
6. Kharchenko, R. Yu., Mykhailenko, V. S., Kochetkov, A. V. Development of a Neuro-Fuzzy Intelligent Network for Monitoring and Control of Microclimate Systems / Automatic Control and Computer Sciences. 2023. 57(1), 27–36. <https://doi.org/10.3103/s0146411623010066>.
7. Xiangjie, L., Felipe, L.-R. Generalized Minimum Variance Control of Steam-Boiler Temperature using NeuroFuzzy Approach / Proceedings of the 5'World Congress on Intelligent Control and Automation, Hangzhou, P.R. China, June 15 – 19, 2018. – P. 134 – 148.

REFERENCES:

1. Åström, K.J., Wittenmark, B. (2018), “Systemy z komp'yuternym keruvannyam, teoriya ta proektuvannya. Prentis-Kholl, Enhlvuds'ki skeli” [Computer controlled systems, theory and design. Prentice-Hall, Englewood Cliffs], (<https://bayanbox.ir/view/8821671619590593184/Adaptive-Control-Astrom-2nd-edition.pdf>).
2. Mikhaïlenko, V.S., Kharchenko, R. Yu. (2014), “Analysis of traditional and neuro-fuzzy adaptive system of controlling the primary steam temperature in the direct flow steam generators in TPS”, *Automatic Control and Computer Sciences*, Vol. 48, No. 6, pp. 334–344. doi: 10.3103/S0146411614060066.
3. Mikhaïlenko, V., Kharchenko, R., Shcherbinin, V., Leshchenko, V. (2021), “Using Neural Network Technologies to Simulate the Working Processes of Ship Steam Boilers”, *Information Resources CEUR Workshop Proceedings* [this link is disabled](#), urn:nbn:de:0074-3126-7, 2021, 3126, pp. 367–373.
4. Li, Y., Ang, K.H., Chong, G.C.Y. (2006), “Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art”, *IEEE Control Systems Magazine*. 2006. 142 p.
5. Kharchenko, R. Y., Kochetkov, A. V., Mikhaïlenko, V. S. (2022), “Analysis of methods for automated research of dc voltage converters of modular structure”, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (3), 7. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-3-1>.
6. Kharchenko, R. Yu., Mykhailenko, V. S., Kochetkov, A. V. (2023), “Development of a Neuro-Fuzzy Intelligent Network for Monitoring and Control of Microclimate Systems”, *Automatic Control and Computer Sciences*, 57(1), 27–36. <https://doi.org/10.3103/s0146411623010066>.
7. Xiangjie, L., Felipe, L.-R. (2018), “Generalized Minimum Variance Control of Steam-Boiler Temperature using NeuroFuzzy Approach”, *Proceedings of the 5'World Congress on Intelligent Control and Automation, Hangzhou, P.R. China, June 15 – 19, 2018*. – P. 134 – 148.

METHODOLOGY FOR SYNTHESIZING A FUZZY ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR A COMPLEX OBJECT

It is known that many complex maritime systems, particularly steam-generating units, exhibit nonlinear characteristics, complex dynamic elements that are challenging to model, uncontrolled noise and disturbances, numerous feedback and cross-links, and other factors that complicate the implementation of optimal automatic control systems (ACS). Over the past two decades, new control methods have been developed based on modern and classical control theories. Both modern (including adaptive and optimal control technologies) and classical control theories have largely relied on the concept of system linearization. However, in practice, only systems with linear parameters and low sensitivity to external and internal disturbances can be feasibly implemented without further adaptation. Ensuring this quality for nonlinear maritime systems, which operate under complex, specific, and often adverse navigation conditions and across various operating modes within a broad range of steam loads, is highly challenging for developers using traditional ACS design methods, and, considering all factors, it is impractical.

Due to these limitations of traditional maritime ACS, enhancing their efficiency in specific operating conditions necessitates the integration of traditional and new intelligent technologies based on fuzzy or neuro-fuzzy systems, which have proven successful in handling complex industrial systems. This paper proposes a synthesis methodology for a fuzzy adaptive ACS for complex maritime systems (specifically, a steam boiler), designed to operate over extended periods under varying steam loads. Modeling of the proposed system was conducted for three operating modes of the maritime unit, with quality metrics for the adaptive ACS evaluated.

Keywords: methodology, synthesis, adaptive control system, fuzzy logic, complex system.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ОСКОЛКОВИХ ПОЛІВ РАДІАЛЬНО-ОСЬОВИХ ОСКОЛКОВО-ФУГАСНИХ СНАРЯДІВ НА ЖИВУ СИЛУ ПРОТИВНИКА

З урахування досвіду російсько-Української війни спостерігається тенденція браку засобів ураження живої сили противника, яка у свою чергу є достатньо захищеною. Для ураження малих груп противника широкого застосування набули безпілотні системи які є досить мобільними, точними та легкими у використанні, здатні переносити широкий спектр засобів ураження в залежності від характеру цілі. Проте при більш широкомасштабних і масивних наступальних діях противник активно застосовує засоби радіо-електронної боротьби, де безпілотні системи виявляються безсилими. Проте основними найбільш ефективними засобами знищення ворожої піхоти залишаються радіально-осьові осколково-фугасні снаряди. Враховуючи співвідношення вартості ворожого піхотинця, який у свою чергу знаходиться в сучасних засобах бронезахисту, та співвідношення собівартості відлитих з відповідної марки сталі з певними домішками радіально-осьового осколково-фугасного снаряду потрібного калібру співвідношення економічних затрат залишаються задовільним.

У статті проведено аналіз впливу осколкових полів радіально-осьових осколково-фугасних снарядів на живу силу противника, яка перебуває в сучасних засобах бронезахисту. Проаналізовано характер дії осколкових полів радіально-осьових осколково-фугасних снарядів. Проведений аналіз показав, що найбільш ймовірним засобом ураження живої сили противника яка перебуває в сучасних засобах бронезахисту чи укриттях легкого типу є артилерійські системи, що ведуть вогонь радіально-осьовими осколково-фугасними снарядами. Таким чином в статті запропоновано аналітичний вираз, який описується законом Пуассона, що дає можливість характеризувати ймовірність ураження живої сили противника, яка знаходиться в сучасних засобах бронезахисту чи укриттях легкого типу за умови що особовий склад противника перебуває в зоні ураження осколкового поля радіально-осьового осколково-фугасного снаряду. Аналітичний вираз може бути використаний як для оцінки вражаючої дії осколкового поля на живу силу противника в сучасних засобах бронезахисту чи укриттях легкого типу так і для оцінки вражаючої дії радіально-осьових осколково-фугасних боєприпасів в цілому.

Ключові слова: осколкові поля, ймовірність, ураження, радіально-осьові осколково-фугасні снаряди, осколок, закон Пуассона, снаряд.

Вступ та постановка проблеми. Як показав досвід російсько-української війни та аналіз опрацьованих джерел, найбільш ефективними засобами ураження живої сили противника залишаються радіально-осьові осколково-фугасні (РООФ) снаряди. Адже цей тип снарядів один з небагатьох, який може ефективно уражати живу силу противника, індивідуальний бронезахист якої постійно покращується.

В нашій статті ми запропонували аналітичний вираз, який описується законом Пуассона. Це дає можливість охарактеризувати ймовірність ураження живої сили противника.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результат проведеного аналізу наукових джерел та праць показали, що відповідно до проведених досліджень існуючих типів боєприпасів найбільш ймовірними засобами ураження живої сили противника є артилерійські системи [1], що ведуть вогонь РООФ боєприпасами [2]. Таким чином для живої сили основним фактором враження є осколкове поле. На теперішній час характер руйнування навантажених вибухом циліндричних оболонок достатньо вивчений. Значний внесок в вивчення характеру вибуху, дроблення оболонки на осколкові фракції зробили В.В. Селіванов [8]. Літвінчук Р. В., Левченко А. О. та Клименко В. В. в своїх статтях [3, 9]

дослідили основні чинники, які визначають ймовірність ураження елементів моторного та бойового відділення легкоброньованої техніки при впливі осколкових боєприпасів. Однак в своїй роботі вони недостатньо дослідили вплив осколків на живу силу противника яка знаходиться в легкоброньованій техніці.

Метою статті є наведення аналітичного виразу, застосування якого дозволить оцінити дію осколкових полів РООФ снарядів на живу силу противника, яка знаходиться в сучасних засобах бронезахисту чи укриттях легкого типу.

Виклад основного матеріалу. Залежно від характеру дії осколкового поля осколки можуть мати наступні особливості:

Природні (кругові осові) утворюються переважно з снарядів виготовлених у результаті цілісного відливання корпусу. В залежності від марки та сплаву сталі залежить розмір осколку, але напрямок дії основної маси осколкового поля та їх кількість є не передбачуваною [10].

Прогнозовані (радіально-направлені) поля летальні можливості яких можна описати та спрогнозувати за допомогою математичного методу дослідження фактично поля заданого дроблення. Принцип дій таких полів обумовлений якістю сталі виготовлення, конструкцією бойової частини снаряду (з готовим забійним елементом, вкрапленням іншого матеріалу, насічки, отвори та ін.). Правильно прогнозована конструкція дає можливість прогнозувати та задавати процес дроблення, здійснювати оцінку летальності за рахунок прогнозованої маси та кількості осколків [10].

Наростаючі, поглинаючі осколкові поля утворюються у результаті інтерференції хвиль (зовнішні, бокові, фронтальні та ін.) які утворюються у наслідок процесу детонації вибухової речовини (фізика зриву). Корпус снаряду під дією внутрішнього тиску починає набувати певної деформації як наслідок у місцях тріщин вивільняються продукти внутрішнього вибуху які у подальшому при утворенні осколкового поля можуть як підсилюватися так і поглиналися в залежності від того як дані хвилі будуть накладатися одна на одну. Саме цей фактор фізичного процесу визначає потужність ударної хвилі та підсилення кінетичної енергії продуктів вибуху [9, 12].

Низькошвидкісними осколковими полями прийнято вважати осколкові поля швидкості яких не перевищує 300 м/с, фактично це поля дозвукові. Такі поля мають місце на не великій відстані від епіцентру вибуху коли продукти вибуху стрімко втрачають кінетичну енергію, але окремі осколки за рахунок своєї маси зберігають достатню летальність [8].

Високошвидкісними осколковими полями слід вважати осколкові поля швидкості яких перевищує 300 м/с, фактично це поля які діють до 0,5 радіусів від калібру снаряду. Дані осколкові поля мають високу швидкість, продукти вибуху підсилюються ударною хвилею, у результаті чого осколкове поле набуває максимальної летальності за рахунок стрімкого зростання кінетичної енергії.

Внаслідок впливу вражаючих факторів осколкового-поля РООФ боєприпасів жива сила противника зазнає санітарних втрат, а легкі укриття руйнування. Вражаючими факторами забезпечення такого результату при підриві РООФ боєприпасів є [7, 11]:

- газоподібні продукти вибуху;
- ударна хвиля;
- осколкове поле;

Кожен з окремо взятих факторів або їх сукупність сприяє санітарним втратам. Залежно від точності влучання, потужності та властивостей бойових частин снарядів, а також від характеристик самих захисних об'єктів результати можуть відрізнятися. Елементи об'єктів вражаються в результаті:

- фугасної дії під час вибуху боєприпасів в повітрі або на земній поверхні;
- осколкової дії під час вибуху боєприпасів в повітрі або на поверхні;
- ударної дії при прямому влучанні боєприпасів в об'єкт, проникненні в ґрунт;
- сейсмічної дії під час вибуху боєприпасів в ґрунті.

Саме осколкова та осколково-фугасна дія боєприпасів забезпечують найбільшу летальність та санітарні втрати в противника. Саме через це ми вважаємо доцільним проаналізувати осколково-фугасну дію РООФ боєприпасів.

Фугасною дією називають нищівну силу боєприпасу, що вибухнув в повітрі або ґрунті на деякій відстані від об'єкта (цілі). На відносно малих відстанях від епіцентру вибуху боєприпасу до об'єкта фугасна дія обумовлюється дією газоподібних продуктів вибуху. При збільшенні цієї відстані вона являє собою спільну дію газоподібних продуктів вибуху і ударної хвилі, що утворилася під час вибуху. На досить великих відстанях фугасна дія зумовлена лише дією ударної хвилі [3]. Таким чином вплив продуктів вибуху проявляється на відстанях, рівних 12 - 16 радіусів дії заряду, а спільна дія продуктів вибуху і ударної хвилі проявляється на відстанях близько 20 радіусів. Радіус дії заряду може бути знайдений за загальною відомою формулою.

$$R_0 = B \sqrt{\frac{3}{4\pi\beta_{вр}}} M, \quad (1)$$

де $\beta_{вр}$ – густина вибухової речовини боєприпасу;

M – маса заряду.

Розрахунки за формулою (1) радіусів дії зарядів боєприпасів, мають широке застосування під час розрахунків з метою нанесення ударів по живій силі противника в ході ведення бойових дій. Також вона переважно вказує, що радіуси дії продуктів вибуху цих снарядів 122 мм., 152 мм., 155 мм., 82 мм., 120 мм., знаходяться в межах 4-6 м., а радіуси спільної дії продуктів вибуху і ударної хвилі 5-8 м. Але таке рішення не завжди є вірним оскільки прийнято вважати що ефективність осколкового поля РООФ снаряду рівна 0.5 радіуса від калібру [6].

Досвід бойових дій показав, що кругові помилки точок влучання 122 мм., осколково-фугасні снаряди самохідних гаубиць 2С1 а також міни калібрів 82 мм. і 120 мм., та інших пострадянських калібрів становить 50-500 м.

З зазначеного вище, можна зробити висновок, що зони дії продуктів вибуху і ударної хвилі порівняно невеликі відносно кругових помилок точок попадання РООФ боєприпасів. З цього можна зробити висновок, що фугасна дія не є основним вражаючим фактором для ураження живої сили противника. Отже жива сила противника переважно вражається осколковими полями РООФ снарядів.

Підчас детонації РООФ боєприпасів окрім продуктів вибуху та ударної хвилі утворюються осколкові поле, які є продуктом дроблення корпусу РООФ боєприпасів. Осколки, що утворилися розлітаються в різні боки від точки вибуху і при попаданні в ціль здатні нанести різні ушкодження.

В першу чергу ефективність осколкового поля залежить від наступних конструктивних параметрів самої бойової частини: форма і властивості металу корпусу, коефіцієнт наповнення, властивості вибухової речовини, загальна вага, особливості конструкції і т.д.

Вище враховане визначає такі фактори як:

- вагу осколків, які утворюються під час вибуху та їх загальну кількість;
- початкову швидкість осколків і характер їх розльоту в просторі.

Ефективність дії осколкового поля залежна від: вражаючої дії осколків, відстані до цілі, орієнтації осі боєприпасу щодо цілі (кута зустрічі з площиною землі).

Таким чином, під час ведення інтенсивних бойових дій із застосуванням усіх наявних засобів ураження найбільшу кількість втрат у живій силі противника забезпечують саме РООФ боєприпаси.

Основна увагу статті спрямована на оцінку вражаючої дії осколкового поля РООФ снарядів та їх впливу на живу силу противника, яка перебуває в сучасних засобах бронезахисту.

Для визначення ймовірності ураження цілі РООФ боєприпасами необхідно попередньо встановити в чому конкретно проявляється нищівна сила осколкового поля, яке потрапило в ціль.

Існує три основних види вражаючої дії осколків [4]:

- пробивна дія;
- запалювальна дія;
- ініціююча дія.

Прояв того чи іншого виду вражаючої дії осколку зумовлений конструктивним особливостями укриття (індивідуального захисту) та місця розташування живої сили противника, наприклад, запальні дії характерні при попаданні осколків в резервуари з палим або інші легкозаймисті речовини, а ініціюють дії - при ураженні боєкомплекту, чи інших засобів ураження. Вражаюча дії осколку проявляється в пробивній дії.

Таким чином вражаюча дію осколкового поля корелюється з імовірністю ураження живої сили противника наступним співвідношенням:

$$P_{урпр} = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - P_{урi}), \quad (2)$$

де I – кількість живої сили противника;

$P_{урi}$ – ймовірність ураження i -го бійця противника;

$P_{урпр}$ – ймовірність ураження живої сили противника.

Співвідношення (2) виконується тоді, коли вражається задовільна кількість живої сили противника яка знаходиться в радіусі дії осколкового поля РООФ снаряду (їх можна назвати критичними і не критичними) ураження хоча би одного бійця знизить боєздатність живої сили противника. Ураження від 30% зробить підрозділ не боєздатним. Так, ймовірність ураження задовільної кількості живої сили противника може бути розрахована зі співвідношення:

$$P_{урпр} = 1 - [\prod_{i=1}^I (1 - P_{урi})] [1 \times C_k^\ell P_{урj}^\ell], \quad (3)$$

де $P_{урпр}$ – ймовірність ураження живої сили противника;

$P_{урi}^\ell$ – ймовірність ураження i -го ворожого піхотинця;

$P_{урj}^\ell$ – ймовірність ураження j -го ворожих піхотинців);

I – не критичні санітарні втрати;

ℓ – критичні санітарні втрати, які необхідно уразити, щоб ворожий підрозділ перестав функціонувати;

K – загальна кількість живої сили противника.

Якби число осколків, які влучили в живу силу противника, можна було точно визначити, то ймовірність ураження живої сили противника можна було розрахувати за формулою:

$$P_{урi} = 1 - [1 - P_{урi}(1)]^{n_i}, \quad (4)$$

де $P_{урi}(1)$ – ймовірність ураження i -го піхотинця одним осколком;

n_i – число потрапивших в живу силу противника осколків.

Практично при постійній середній густині осколкового поля в потоці осколків є деякі випадковим чином розташовані неоднорідності «згустки». Розташування живої сили противника в осколковому полі також є випадковим.

Отже, в розглянутий сектор перебування живої сили противника може потрапити різна кількість осколків. З теорії ймовірності відомо, що якщо точки попадання осколків розподілені на площині статистично рівномірно і незалежно один від одного, то закон

розподілу числа осколків, що потрапили в живу силу противника описується законом Пуассона. Дослідні дані свідчать про те, що закон розподілу числа осколків, які потрапили в живу силу противника, кутові розміри яких малі в порівнянні з шириною сектора розльоту осколків, дійсно близький закону Пуассона [5]. Так як сучасні засоби розвідки артилерійських підрозділів здатні забезпечити стрільбу з помилкою, більше, ніж розміри живої сили, чи укриття противника, тому з'ясувалося, що закон розподілу осколків на площині укриття можна вважати законом Пуассона, а координатний закон ураження живої сили противника має вигляд [5].

$$P_{ypp} = 1 - 1^{-\bar{m}P_{ypp}}(1), \quad (5)$$

де $P_{ypp}(1)$ – ймовірність ураження живої сили противника одним осколком, який потрапив в нього; яка може бути визначена аналогічним чином із співвідношення (3), де під $P_{yri}(j)$ розуміється ймовірність ураження i -го (j -го) піхотинця противника одним осколком, що потрапив в нього;

$\bar{m}$ – середнє число осколків, що уразили живу силу противника.

Зі співвідношень (5), (3) випливає, що для прогнозування нанесення втрат живій силі противника за рахунок дії осколкових полів РООФ снарядів необхідно обчислити ймовірності ураження його одним осколком $P_{yri}(j)^{(1)}$ і середнє число осколків що потрапило в місце скупчення живої сили противника.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Отже сучасний рівень розвитку науки та техніки дає змогу дослідити ефективність осколкових полів РООФ снарядів та їх вплив на живу силу противника математичними та експериментальними методами. А також розробити чи удосконалити існуючі наукові методи (методики) з метою більш глибокого та детального дослідження структури осколкових полів. Проте поєднання у подальшому даних методів (методик) з аналітичними виразом, надають можливості характеризувати ймовірності ураження живої сили противника яка знаходиться в сучасних засобах бронезахисту чи укриттях легкого типу.

Отже, даний аналітичний вираз можна використати як для оцінки летальності осколкових полів, так і для оцінки вражаючої дії РООФ боєприпасів на живучість підрозділів противника який знаходиться в сучасних засобах бронезахисту чи укриттях легкого типу в цілому.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Греков В. П., Журавльов О. О., Ткаченко Ю. А. Метод оцінки розміру приведеної площі осколкового ураження касетної бойової частини реактивного снаряду з осколково-фугасними бойовими елементами. Системи озброєння і військова техніка. 2019. №1 (57). С. 77-84 .
2. Сидоренко Ю.М. Особливості процесу вибухового метання осколкоутворюючих дисків, що входять до складу осколково-пучкового снаряда. *Зб. наук. праць Академії ВМС ім. П.С. Нахімова*. 2012. Вип. № 1(9). С. 86–99.
3. Літвінчук Р. В., Левченко А. О. Графо-аналітичний метод визначення ймовірності ураження елементів моторного та бойового відділення легко броньованої техніки загальновійськових підрозділів. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2021. Вип. № 2 (8). С. 63 – 71.
4. Кушнір О. О., Кушнір В. П. Дослідження властивостей високонадійної системи із захистом у випадку Пуассонівського процесу відновлення. *Theory of Probability and Mathematical Statistics*. 2017. № 96, С. 125-130.
5. Catovic A., Kljuno E. A novel method for determination of lethal radius for high-explosive artillery projectiles. *Defence Technology*. 2021. № 17. Pp. 1217 – 1233 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914720303834?via%3Dihub> (дата звернення: 29.07.2024).

6. Андреев С. Г., Бабкин Ю. А., Баум Ф. А. Физика взрыва в 2 т. Т. 1. Москва, 2002. 832 с.
7. Курепин А.Е., Мансуров С.Н., Воротынцева И.В., Краснов А.А., Исаев Г.Ш., Чернов А.Я. Определение характеристик низкоскоростных (до 300 м/с) осколочных полей поражения. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*. 2016. Вып. 4. С. 58-63.
8. Селиванов В.В. Боеприпасы. В 2 томах. Т. 1. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 506 с.
9. Літвінчук Р. В., Левченко А. О., Клименко В. В. Вплив вражаючої дії осколкових боеприпасів на елементи об'єктів і легко броньовану техніку підрозділів. *Системи озброєння і військова техніка*. 2021. № 3(67). С. 19-23.
10. Ткачук П.П., Чумакевич В.О., Дробан О.М., Федор Б.С., Евдокимов П.М. Боеприпасы: Львів. 2011. 319 с.
11. Журавлев А.А., Орлов С.В. Обґрунтування значення площі досвідного ураження цілі в засобах ураження, оснащеними осколочно-фугасними боеприпасами. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. Харків. 2012, Вип. 3(9) С. 176-178.
12. Бричинський О.В., Окіпняк Д.А., Малюк В.М., Бурашніков О.О., Ковальов Г.Г., Фарбота А.І., Нецадін О.В., Головатий Р.М. Вибухова справа. Львів. 2023. 488с.

REFERENCES:

- 1.Hrekov, V. P., Zhuravlov, O. O. and Tkachenko, Yu. A. (2019), “Metod otsinky rozmiru pryvedenoї ploshchi oskolkovoho urazhennia kasetnoi boiovoi chastyny reaktivnoho snariadu z oskolkovo-fugasnyimi boiovyimi elementamy” [The method of estimating the size of the reduced area of fragmentation damage of the cluster warhead of a rocket projectile with high-explosive warheads], *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, No. 1(57), pp. 77-84.
- 2.Sydorenko, Yu. A. (2012). “Osoblyvosti protsesu vybukhovoho metannia oskolkoutvoriuiuchykh dyskiv, shcho vkhodiat do skladu oskolkovo-puchkovoho snariada” [Peculiarities of the process of explosive throwing of fragmentation discs that are part of a fragmentation-beam projectile]. *Zb. nauk. prats Akademii VMSim. P.S. Nakhimova* No. 1(9), pp. 86–99.
- 3.Litvinchuk, R. V. and Levchenko, A. O. (2021). “Hrafo-analitychnyi metod vyznachennia ymovirnosti urazhennia elementiv motornoho ta boiovooho viddilennia lehko bronovanoi tekhniki zahalnoviiskovykh pidrozdiliv” [A graph-analytical method of determining the probability of damage to the elements of the motor and combat department of lightly armored vehicles of the combined military units.]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki*, No. 2 (8), pp. 63 – 71.
- 4.Kushnir, O. O. and Kushnir, V. P. (2017). “Doslidzhennia vlastyvostei vysokonadiinoi systemy iz zakhystom u vypadku Puasonivskoho protsesu vidnovlennia” [Investigation of the properties of a highly reliable system with protection in the case of a Poisson recovery process]. *Theory of Probability and Mathematical Statistics*, No. 96, pp. 125-130.
- 5.Catovic, A. and Klijuno, E. (2021). “Novel method for determination of lethal radius for high-explosive artillery projectiles”. *Defence Technology*, No.17, pp. 1217 – 1233 Retrieved from URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214914720303834?via%3Dihub>.
- 6.Andreev, S. H., Babkin, Yu. A. and Baum, F. A. (2002). “Fizika vzryva” v 2 t [Physics of Explosion in 2 volumes]. (Vol. 1). Moskwa: Fizmatlit, 832 p.
- 7.Kurepin, A. E., Mansurov, S. N., Vorotyntseva, I. V., Krasnov, A. A, Isaev, G. Sh. and Chernov, A. Ya. (2016). Opredelenie harakteristik nizkoskorostnyh (do 300 m/s) oskolochnyh polej porazheniya [Determination of the characteristics of low-speed (up to 300 m/s) fragmentation fields of destruction.]. *Vestnik Koncerna VKO «Almaz – Antej»*, No. 4, pp. 58-63.
- 8.Selivanov, V. (2016) Boepripasy. V 2 tomah [Ammunition in 2 volumes]. (Vol. 1). Moskwa: MHTU im. N. E. Bauman, 506 p.
- 9.Litvinchuk, R. V., Levchenko, A. O. and Klymenko, V. V. (2021). Vplyv vrazhaiuchoi dii oskolkovykh boieprypasiv na elementy obiektiv i lehko bronovanu tekhniku pidrozdiliv [The impact of the

impact of fragmentation munitions on the elements of the objects and the lightly armored vehicles of the units]. *Systemy ozbroienia i viiskova tekhnika*. No. 3(67), pp. 19-23.

10.Tkachuk, P.P., Chumakevych, V.O., Droban, O.M., Fedor, B.S. and Evdokymov P.M. (2011). "Boieprypasy". [Ammunition]. 319 p.

11.Zhuravliev, A.A. and Orlov S.V. (2012). "Obgruntuvannia znachennia ploshchi dosvidnoho urazhennia tsili zasobamy urazhennia, osnashchenymy oskolochno-fuhasnymy boieprypasamy"[Substantiation of the value of the area of experimental target destruction in the means of destruction equipped with high-explosive munitions]. *Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, No. 3(9), pp 176-178.

12.Brychynskyi, O.V., Okipniak, D.A., Maliuk, V.M., Burashnikov, O.O., Kovalov, H.H, Farbota, A.I., Neshchadin, O.V. and Holovaty, R.M. (2023). "Vybukhova sprava"[Explosives business]. *National Academy of Land Forces*. 488 p.

Dr. Tech. Sci. Yakovenko V. V., Ivantsov V. P., Makalish O. V.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF FRAGMENT FIELDS RADIAL-AXIAL FRAGMENT-EXPLOSIVE PROJECTILE ON THE ENEMY'S MANPOWER

Taking into account the experience of the Russian-Ukrainian war, there is a trend of a lack of means of defeating the enemy's manpower, which in turn provides sufficient protection. To defeat small groups of the enemy, unmanned systems have become widely used, which are quite mobile, accurate and easy to use, capable of carrying a wide range of means of destruction, depending on the nature of the target. However, with large-scale and massive offensive actions, the enemy actively uses radio-electronic warfare, where unmanned systems are powerless, but radial-axial high-explosive shells remain the main and most effective means of destroying enemy infantry. Taking into account the ratio of the cost of an enemy infantryman who is in modern means of armor protection and the ratio of the cost of cast from the appropriate grade of steel with certain impurities of a radial-axial high-explosive projectile of the required caliber, the ratio of economic costs remains favorable.

The article analyzes the impact of the fragmentation fields of radial-axial high-explosive projectiles on the enemy's manpower, which is in modern means of armor protection. The nature of the effect of the fragmentation fields of radial-axial high-explosive projectiles is analyzed. The conducted analysis showed that the most likely means of defeating the enemy's manpower, which is in modern means of armor protection or light shelters, are artillery systems firing radial-axial high-explosive shells. Thus, the article offers an analytical expression described by Poisson's law, which makes it possible to characterize the probability of damage to the enemy's manpower located in modern means of armor protection or light-type shelters, provided that the enemy's personnel is in the zone of damage of the fragmentation field of the radial-axial high-explosive fragmentation field projectile. The analytical expression can be used both to estimate the striking effect of the fragmentation field on the enemy's manpower in modern means of armor protection or light-type shelters, and to estimate the striking effect of radial-axial high-explosive munitions in general.

Keywords: *fragmentation fields, probability, damage, radial-axial high-explosive projectiles, fragment, Poisson's law, projectile.*

THE INTEGRATION OF IOT AND MATHEMATICAL MODELS IN CLIMATE CHANGE MITIGATION

A strategy for using IoT devices to collect real-time environmental data that takes into account the most significant indicators is described. The advantages of using the Internet of Things have also been determined, which makes it possible to monitor the state of the climate in a convenient mode with high accuracy and speed. Because the task of analyzing using mathematical models to optimize energy efficiency, monitor air quality, and strengthen sustainability efforts is complex, it requires the involvement of specific specialists, such as systems analysts, mathematicians, and climatologists. Temperature, humidity and precipitation, among others, are parameters obtained by using Internet of Things devices for analysis. Climate models such as dynamic systems and simple low-order models for studying climate variability are considered, and equations of momentum, thermodynamics, specific humidity, non-primary, hydrostatic and thermodynamics connecting variable states are also described. The use of these equations within the considered models and the values of their parameters are explained, some of which are the result obtained with the help of Internet of Things technologies. It also describes the necessary technologies needed to build an Internet of Things network: microcircuits, sensors, embedded computer, wireless network and protocols.

Climate models of varying degrees of complexity are used to predict climate change and variability on a global and regional scale. Mathematical and climate models are very important for preparing society for the development and implementation of so-called adaptation strategies and measures necessary to reduce the effects of climate change. Adaptation is understood as the process of society getting used to current and predicted changes in the climate system and its impacts. The scientific novelty of the research is determined by the fact that for the first time a review of the integration of IoT and mathematical models for environmental protection was carried out, which made it possible to understand the regularities of the construction of these mathematical models and to reveal the regularities of such integration.

The obtained research results, both theoretically and practically, serve as the basis for further scientific and applied works aimed at improving and improving various aspects of the use of "Internet" devices of things" to collect real-time environmental data and further analyze it using mathematical models to optimize energy efficiency, monitor air quality and strengthen sustainability efforts. The described strategy of using the Internet of Things and mathematical models is important for the life of any person, the work of enterprises and authorities. In the long term, the use of Internet of Things technologies and mathematical models in mitigating the effects of climate change can have a positive impact on the development of the entire human civilization.

Keywords: internet of things; mathematical model; dynamical system; external forcing; governing equation

Introduction. The relevance of the task of integrating IoT and mathematical models in mitigating the consequences of climate change consists of several factors. The first of them is the need to create a strategy for using IoT tools for climate control. The evolution of humanity has caused a negative impact on nature, the extent of which cannot be estimated without the use of modern concepts, one of which is IoT. The Internet of Things is a concept of a network consisting of interconnected physical devices that have built-in transmitters, as well as software that allows the transfer and exchange of data between the physical world and computer systems in automatic mode, using standard communication protocols. IoT-based solutions mainly solve consumer and enterprise problems, however, some important global climate problems can also be solved with the help of IoT technology. The combination of IoT technologies and mathematical models can provide the means to optimize energy efficiency, monitor air quality, and enhance sustainability efforts.

Solving the task of climate monitoring in real time using IoT is described in works [1-5]. It is also proposed to use the Internet of Things as an ecosystem of devices that allow to ensure energy efficiency and safety in works [6,7]. Control of environmental pollution using IoT is mentioned in works [8,9]. Mathematical modeling of climate changes in the context of external ergonomics appears in work [10]. And work [11] describes a computational approach to the mathematical model of climate change using heat and diffusion sources. The impact of climate change and deforestation is mathematically modeled in work [12]. For greater use of IoT in mitigating the effects of climate change, it is necessary to attract large financial and technical resources that can be done by public or private businesses. Examples of the use of the Internet of Things by businesses in Romania to determine the climatic prerequisites for the expansion of the Amurg variety in Transylvania are given in work [13].

Analysis of latest research and problem statement. Formulating a strategy to integrate IoT and mathematical models of climate change mitigation is a complex process that requires the analysis of several different factors. However, before implementing this integration, it is necessary to evaluate it and understand the impact it will have on optimizing energy efficiency, monitoring air quality and strengthening sustainable development efforts in the future.

To form the integration of IoT and mathematical models, it is necessary to first analyze the existing mathematical models of environmental data analysis. This may include an assessment of the problem of modeling climate change processes, based on defined parameters.

The next stage is an assessment of the benefits of using the Internet of Things. It involves analyzing the strengths and weaknesses of this concept to identify possible integration points. After that, a strategy should be formed, which may include the development of technologies to build the Internet of Things that meet the needs of analysis using mathematical models. The first stage is the consideration of climate models as dynamic systems and the analysis of their sensitivity. At this stage, the general appearance of the mathematical model is formulated thanks to a set of three-dimensional nonlinear partial differential equations and a generalized discrete climate model and stochastic climate models, which were first proposed by Hasselman, which must be taken into account for the construction of climate models as dynamic systems.

At the second stage, the response of the climate system to external disturbances is evaluated based on the sensitivity analysis of dynamic systems. The evaluation is based on information from open sources. At the third stage, the sensitivity analysis of the chaotic dynamic system is implemented. At the fourth stage, mathematical models of climate systems based on the main equations (momentum, thermodynamics, precipitation) are considered.

A number of general scientific methods were used to perform the research stages of the integration of IoT and mathematical models for environmental protection, namely: monitoring method: used to collect, systematize and analyze information about mathematical models and the concept of the Internet of Things; comparison method: came in handy when researching the equations of mathematical models and their parameters; method of abstraction: used in the course of research in order to highlight the main concepts and categories; abstract-logical and dialectical methods of scientific knowledge, as well as the method of scientific abstraction, were used in the study to form theoretical generalizations, clarify the conceptual apparatus, and formulate conclusions.

That is why a number of unresolved issues arise in these conditions. The issue of creating a software application based on the integration of IoT and mathematical models, which will make it possible to monitor the state of the climate, optimize energy efficiency and strengthen efforts towards sustainable development, requires additional research.

Presentation of the main material. The first step of this scientific research is the definition of the main mathematical models of climate change and Internet of Things technologies that allow obtaining data for these models.

There are several mathematical models for assessing climate change, the main ones being:

- climate models as dynamical systems and their sensitivity analysis: (climate as a complex dynamical system, climate system sensitivity to external forcing, sensitivity analysis of a chaotic dynamical system);
- governing equations and low-order simple;
- models to study climate variability.

The relationship between the main mathematical models for climate change assessment is shown in fig. 1.

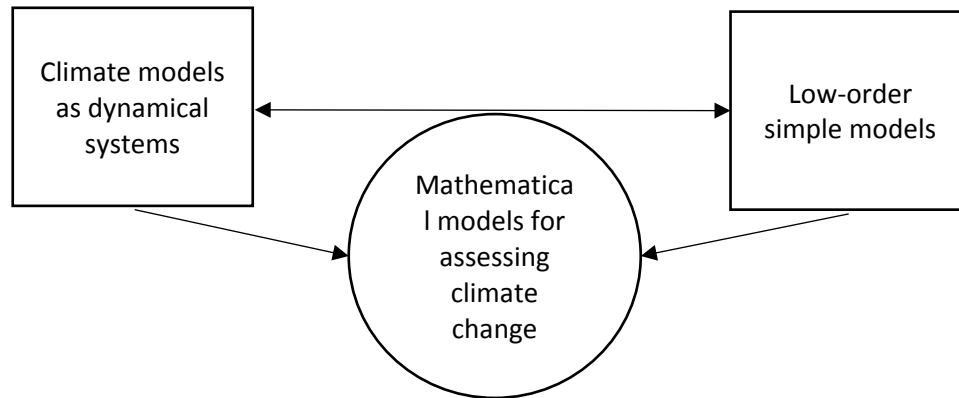


Figure 1 – Mathematical models for climate change assessment

Also, Fig. 1 shows that the use of climate models as dynamical systems and simple low-order models are usually complementary when trying to assess climate change.

Mathematical modeling is the most effective tool for studying climate change and predicting its future state in specific regions and at the global level. Mathematical modeling involves the development of a number of complex mathematical models in which the simulated processes of climate change are presented in the form of a dynamic system and described by a set of ordinary or partial differential equations. These equations are based on the basic laws of physics, such as the laws of conservation of mass, momentum, and energy. Some of the values used in these equations are the result of the work of information systems built on the basis of the Internet of Things concept and using the following technologies:

- a simple, compact technology is needed to identify each object. It is possible to collect and accumulate information about a certain subject only if there is a system of unique identification. Such functionality can be provided using RFID (Radio-Frequency IDentification) chips. They are able to transmit information to reading devices without their own power source. Each chip has an individual number;

- to monitor changes in the state of the element or the surrounding environment, objects must be equipped with sensors;

- an embedded computer) must be used for processing and accumulating data from sensors;

- wireless network technologies (Wi-Fi, Bluetooth) can be used to exchange information between devices;

- optimized and light-weight protocols such as MQTT are used for data transfer. They are based on the principles of publication and subscription where each device (transmitter or sensor) interacts with the program on the server (broker).

Using the concept of the Internet of Things to monitor climate change, through the use of sensors, provides basic values of temperature, humidity, pressure, and others. These parameters are then applied in mathematical models to process optimization and enhance sustainability efforts.

The next step of this scientific research is a review of the main mathematical models of climate change and the equations used to build them.

Ecological Site Classification (ESC) is a web-based decision support system that helps forest managers and planners select tree species that are ecologically suitable for specific sites, rather than selecting a species and trying to modify the site accordingly. Only mathematical modelling can serve as the main tool for studying the Ecological Site Classification. In a formalized form, a model of the ECS is a set of 3D nonlinear differential equations in partial derivatives that generates a deterministic finite-dimensional semi-dynamical system:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= F(x, \lambda, f), \quad x \in \{R\}^n, \\ x|_{\{t=0\}} &= x_0, \quad t \geq 0, \end{aligned} \quad (1)$$

where x is the vector of state variables characterizing the system state at a given time t , x_0 is a given initial state of a system, n is the dynamical system dimension, $x \in \{R\}^n$ is the n -dimensional parameter vector and f is an external forcing.

Since analytical solutions for the climate system models are commonly not available, we used numerical methods to solve this Equation. The numerical solution of the discrete model equations is only possible with the use of high-performance computers.

A generalized discrete climate model, which is used in computer simulations, can be written in a formal form in the following way:

$$x_k = M_{\{0,k\}}(x_0), \quad k = 1, \dots, K, \quad (2)$$

where $M_{\{0,k\}}$ is a nonlinear model operator that propagates state variables from the initial time t_0 to time t_k (this operator indirectly contains model parameters, including external forcing) and K is the number of time steps.

The system of equations of mathematical models that use parameters collected with the help of Internet of Things technologies consists of the following:

- two momentum equations;
- the thermodynamic equation;
- the equation for specific humidity that describes the hydrological cycle;
- the continuity equation;
- hydrostatic equation;
- the equation of state.

The two momentum equations have the following form:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \varphi} \left[-\Omega p_s \vartheta \cos \varphi + \frac{\partial}{\partial \lambda} (\Phi + K) + \frac{RT \partial p_s}{p_s \partial \lambda} + \sigma \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right] &= F_u, \\ \frac{\partial \vartheta}{\partial t} + \Omega p_s u + \frac{1}{a} \left[\frac{\partial}{\partial \varphi} (\Phi + K) + \frac{RT \partial p_s}{p_s \partial \varphi} + \sigma \frac{\partial \vartheta}{\partial \sigma} \right] &= F_\vartheta, \end{aligned} \quad (3)$$

The mathematical statement of Newton's second law of motion is called the momentum equation. As momentum is a vector quantity, the momentum equation is a vectorial equation.

The thermodynamic equation is written in the following form:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_s T}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial u p_s T}{\partial \lambda} + \frac{\partial \vartheta p_s \cos \varphi T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial \sigma p_s T}{\partial \sigma} - \\ - \frac{RT}{c_p \vartheta} \left[p_s \sigma + \sigma \left(\frac{\partial p_s}{\partial t} + \frac{u \partial p_s}{a \cos \varphi \partial \lambda} + \frac{\vartheta \partial p_s}{a \partial \varphi} \right) \right] &= p_s (F_T + \epsilon), \end{aligned} \quad (4)$$

Thermodynamic equations relate various thermodynamic quantities and physical properties measured in laboratory or industrial processes.

The equation for specific humidity that describes the hydrological cycle is written in the following form:

$$\frac{\partial p_s q}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial u p_s q}{\partial \lambda} + \frac{\partial \vartheta p_s \cos \varphi q}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial \sigma p_s q}{\partial \sigma} = p_s [F_q - (C - E)], \quad (5)$$

Specific humidity is defined as the ratio of air humidity to the absolute water vapor pressure of the air.

The continuity equation is written in the following form:

$$\frac{\partial p_s}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \varphi} \int_0^1 \left(\frac{\partial p_s u}{\partial \lambda} + \frac{\partial \vartheta p_s \cos \varphi}{\partial \varphi} \right) \partial \vartheta = 0, \quad (6)$$

The continuity equation is used to describe conservation of atmospheric mass. Conservation means that in an isolated system that parameter remains constant. It's not created. It's not destroyed. But it can move around. There are certain parameters (energy, momentum, mass, air, water, ozone, number of atoms, etc.) that must be conserved.

The hydrostatic equation is expressed as:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \vartheta} = - \frac{RT}{\vartheta} \quad (7)$$

The change in pressure with change in altitude is equal to the average air density multiplied by the gravitational constant. The negative sign is due to the fact that pressure decreases with height (usually when plotting a graph, values on the y-axis increase with height, this is the opposite of atmospheric pressure). The quantity on the right side of the equation is the density. Air density is a function of temperature and humidity. An increase in water vapor content and/or an increase in temperature leads to a decrease in density. In very cold air, the air is very dense. Therefore, $\partial \Phi / \partial \vartheta$ is large in cold air (the change in pressure with height is large). This means that in cold air the pressure drops quickly, and the thickness of the cold air mass is small (the atmosphere thins vertically when it is cold). In warm air, the opposite is true, warm air expands and occupies a larger volume. The thickness of warm air and the depth of the atmosphere are greater in a warm air mass. Because warm air has a low density, the change in pressure with height in warm air is less than in cold air.

The thermodynamic equation connecting the state variables is written in the form:

$$p = \rho R T_{\vartheta} \quad (8)$$

The equation of state establishes a direct relationship between density and pressure, an inverse relationship between density and temperature, and a direct relationship between temperature and pressure.

Here ϑ and u are the meridional and zonal components of the wind; a is the Earth's mean radius; $\sigma = d\sigma/dt$ is an analogue of the vertical speed in the σ coordinate system; T is temperature; Φ – geopotential; $\Omega = \zeta + f$ is the absolute vorticity, where ζ is the relative vorticity; f is the Coriolis parameter; K is the kinetic energy; R is the gas constant for dry air; q is the specific humidity; C_p is the specific heat of dry air at constant pressure; T_{ϑ} is the virtual temperature; and ρ is the air density. The terms F_u and F_{ϑ} describe the vertical friction and the horizontal diffusion processes; ϵ is the diabatic heating rate; F_T and F_q describe the vertical and horizontal diffusion of heat and water vapor, respectively; and C and E describe the source and sink processes for water vapor, respectively.

The considered equations of mathematical models demonstrate the importance of monitoring climate changes by means of the Internet of Things, as the equations contain parameters that are physical quantities used to denote various climatic phenomena.

The last step of this scientific research was the determination of the climate response time to various factors based on the equation of the two-block EBM model.

It is very important to point out that although the mathematical models developed in various research centers fairly consistently predict warming in the future, the indicators that characterize the response of the climate system to radiation pollution differ significantly from model to model.

Simple linear systems, such as the two-block EBM with additive stochastic forcing, which is parameterized by Gaussian white noise, have proven useful for investigating climate change on time

scales ranging from years to decades. These models are able to explain much of the observed climate change on time scales ranging from annual to several decades. The equation of the two-block EBM model has the following form:

$$\begin{aligned} C \left(\frac{dT}{dt} \right) &= -\lambda T - \gamma(T - T_D) + F_S \\ C_D \left(\frac{dT_D}{dt} \right) &= \gamma(T - T_D), \end{aligned} \quad (9)$$

where C is the effective heat capacity of the upper box, consisting of the atmosphere and the oceanic surface mixed layer and characterized the climate system inertia; λ , which is called the climate feedback parameter, is the proportionality coefficient between the radiative response and the global mean surface temperature (GMST); γ is the deep ocean heat uptake parameter; C_D is the effective heat capacity of the deep ocean; and F_S is the stochastic forcing.

The response of the climate to the radiation impact caused by human activity has a wide range of time scales.

For example, the response time of the atmosphere is only a few weeks. The reaction time of a system that includes not only the atmosphere but also the ocean layer is several years, while a system that includes the deep ocean characterized by time scales from decades to centuries and even longer.

Signs of the fundamental nature of the conducted research are that the research results can become the basis for new fundamental, applied works and developments and that the research has a broad theoretical base.

The scientific novelty of the conducted research is determined; the integration of IoT and mathematical models for environmental protection was reviewed for the first time; revealed regularities of building mathematical climate models; patterns of integration of the Internet of Things and mathematical models were revealed.

Conclusions. The integration of the Internet of Things for climate monitoring and real-time environmental data collection provides the necessary parameters for their further use in mathematical models of climate change prediction. Mathematical models of climate change predictions are based on a set of equations that have numerical values and are usually solved by computer because of their complexity.

The use of IoT and mathematical models in the assessment of climate change contributes to the optimization of energy efficiency, monitoring of air quality and strengthening of sustainable development efforts. The use of climate models as dynamical systems and simple low-order models are usually complementary when trying to assess climate change. For detailed modeling of physical, chemical and biological processes in the atmosphere, ocean, land and cryosphere, it is necessary to use the most powerful supercomputers capable of creating a forecast of climate change.

Global and regional climate change projections have a rather high degree of uncertainty for scenarios of greenhouse gas emissions. The effectiveness of the scientific research is confirmed by the fact that with the help of the review of the integration of IoT and mathematical models for environmental protection, for the first time, the regularities of the construction of these mathematical models and their integration with the Internet of Things were revealed.

REFERENCES:

1. Saeed, N., Al-Naffouri, T. Y., Alouini, M. S. (2020). Around the world of IoT/climate monitoring using internet of X-things. *IEEE Internet of Things Magazine*, 3(2), 82-83 p.
2. Muslim, M. A., Setyawan, R. A., Basuki, A., Razak, A. A., Hario, F. P., Fernando, E. (2021). IOT based climate monitoring system. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 746, No. 1, p. 012044). IOP Publishing.

3. Rahut, Y., Afreen, R., Kamini, D., Gnanamalar, S. S. (2018). Smart weather monitoring and real time alert system using IoT. International Research Journal of Engineering and Technology, 5(10), 848-854 p.
4. Fang, S., Da Xu, L., Zhu, Y., Ahati, J., Pei, H., Yan, J., Liu, Z. (2014). An integrated system for regional environmental monitoring and management based on internet of things. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 10(2), 1596-1605 p.
5. Kishorebabu, V., Sravanthi, R. (2020). Real time monitoring of environmental parameters using IOT. Wireless Personal Communications, 112(2), 785-808 p.
6. Ullah, I., Fayaz, M., Aman, M., Kim, D. (2022). An optimization scheme for IoT based smart greenhouse climate control with efficient energy consumption. Computing, 104(2), 433-457 p.
7. Рябчун, Ю., Середа, Д., Кохан, В., Доля, О. (2023). Можливості та переваги українського ринку технологій «розумний будинок». Управління розвитком складних систем, (56), 181-187 p. [In Ukrainian]
8. Saha, H. N., Auddy, S., Chatterjee, A., Pal, S., Pandey, S., Singh, R., Maity, A. (2017). Pollution control using internet of things (IoT). In 2017 8th Annual Industrial Automation and Electromechanical Engineering Conference (IEMECON), 65-68 p. IEEE.
9. Singh, G., Kumar, G., Bhatnagar, V., Srivastava, A., Jyoti, K. (2019). Pollution management through internet of things: a substantial solution for society. Humanities & Social Sciences Reviews, 7(5), 1231-1237.
10. Soldatenko, S., Bogomolov, A., Ronzhin, A. (2021). Mathematical modelling of climate change and variability in the context of outdoor ergonomics. Mathematics, 9(22), 2920.
11. Arif, M. S., Abodayeh, K., Nawaz, Y. (2022). A computational approach to a mathematical model of climate change using heat sources and diffusion. Civil Engineering Journal, 8(7), 1358-1368.
12. Cantin, G., Ducrot, A., Funatsu, B. M. (2021). Mathematical modeling of forest ecosystems by a reaction–diffusion–advection system: impacts of climate change and deforestation. Journal of Mathematical Biology, 83(6), 66.
13. Chedea, V. S., Drăgulescu, A. M., Tomoiagă, L. L., Bălăceanu, C., Iliescu, M. L. (2021). Climate change and internet of things technologies – Sustainable premises of extending the culture of the amurg cultivar in Transylvania – A use case for Târnave Vineyard. Sustainability, 13(15), 8170.

Дансо Д.О., д.т.н., проф. Дружинін В.А.

ІНТЕГРАЦІЯ ІОТ ТА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ У ПОМ'ЯКШЕННЯ НАСЛІДКІВ ЗМІНИ КЛІМАТУ

Описано стратегію використання пристроїв «інтернет речей» для збору даних про навколишнє середовище в реальному часі, що враховує найбільш значущі показники. Також визначено переваги використання інтернет речей, що дає можливість моніторити стан клімату у зручному режимі з високою точністю та швидкістю. Оскільки задача аналізу за допомогою математичних моделей для оптимізації енергоефективності, моніторингу якості повітря та посилення зусиль щодо сталого розвитку складна, то вона потребує залучення окремих спеціалістів, таких як системні аналітики, математики та кліматологи. Отриманими, шляхом використання пристроїв «інтернет речей» параметрами для аналізу є температура, вологість і опади та інші. Розглянуто такі кліматичні моделі як динамічні системи та прості моделі низького порядку для вивчення мінливості клімату, також описані рівняння: імпульсу, термодинаміки, питомої вологості, непервності, гідростатичне та термодинаміки, що з'єднує змінні стану. Пояснено використання цих рівнянь в рамках розглянутих моделей та значення їх параметрів, частина з яких є результатом, що отриманий за допомогою роботи технологій інтернет речей. Також описані необхідні технології, що потрібні для побудови мережі інтернет речей: мікросхеми, сенсори, вбудований комп'ютер, бездротова мережа та протоколи.

Кліматичні моделі різного ступеня складності використовуються для прогнозування зміни клімату та мінливості у глобальному та регіональних масштабах. Математичні і кліматичні моделі дуже важливі для підготовки суспільства до розробки та реалізації так званих стратегій адаптації та заходів, необхідних для зменшення наслідків зміни клімату. Під адаптацією розуміється процес звикання суспільства до поточних і прогнозованих змін кліматичної системи та її впливів. Науковою новизною дослідження визначено те що вперше був проведений огляд інтеграції IoT і математичних моделей для захисту навколишнього середовища, що дозволило зрозуміти закономірності побудови цих математичних моделей і виявити закономірності такої інтеграції.

Отримані результати дослідження, як у теоретичному, так і практичному плані, служать основою для подальших науково-прикладних праць, спрямованих на удосконалення та покращення різних аспектів використання пристроїв «інтернет речей» для збору даних про навколишнє середовище в реальному часі та їх подальшого аналізу за допомогою математичних моделей для оптимізації енергоефективності, моніторингу якості повітря та посилення зусиль щодо сталого розвитку. Описана стратегія використання інтернет речей та математичних моделей є важливою для життя будь-якої людини, роботи підприємств та органів влади. В довготривалій перспективі саме використання технологій «інтернет речей» та математичних моделей у пом'якшенні наслідків зміни клімату може дати позитивний вплив на розвиток всієї людської цивілізації.

Ключові слова: інтернет речей; математична модель; динамічна система; зовнішній вплив; головне рівняння.

ІНТЕГРАЦІЯ ОБ'ЄКТА ТЗ-ВЗ В АВТОМАТИЗОВАНУ СИСТЕМУ УПРАВЛІННЯ ВОГНЕМ АРТИЛЕРІЇ

Автоматизовані системи управління вогнем артилерії (АСУва) відіграють важливу роль у сучасних бойових діях у прикордонних областях України. Такі системи дозволяють значно підвищити ефективність застосування не лише окремих вогневих засобів, а й угруповань таких систем. Автоматизація процесу управління вогнем забезпечує оперативну передачу (розподіл та перерозподіл) цілевказань, що призводить до підвищення точності та ефективності дій артилерійських підрозділів.

На практиці, існуючі АСУва мають ряд недоліків, таких як складність, вартість та тривалі терміни розробки. Наявність та використання на фронті артилерійських систем розробки минулого століття та різних виробників значно ускладнює (а іноді – унеможлиблює) впровадження АСУва, внаслідок відсутності уніфікації та стандартизації компонентів.

Одним зі шляхів розвитку та вдосконалення АСУва є впровадження уніфікованої системи автоматизованого управління (САУ) об'єктом типу транспортний засіб – вогневий засіб (ТЗ-ВЗ). Така САУ може бути використана як основа для розробки нових АСУва, а також для модернізації існуючих.

У статті розглядаються принципи та завдання АСУ вогнем артилерії, а також пропонується напрямок їх удосконалення за допомогою САУ ТЗ-ВЗ.

У класичних задачах теорії автоматичного управління часто виникає необхідність врахування обмежень на змінні стану. Наявність таких обмежень розглядається в рамках двох підходів. Обмеження можуть розглядатися як певні умови, виконання яких не гарантується фізичними властивостями об'єкта і повинно забезпечуватися належним вибором управління. При другому підході, обмеження на змінні стану враховуються за допомогою введення нелінійних статичних характеристик із насиченням. При цьому, в моделі об'єкта обмеження накладаються не на вектор змінних стану, а на вектор їх похідних – вхідні сигнали окремих ланок системи. Вихід змінних стану за межі, визначеними статичними нелінійностями, загалом, можливий.

Ключові слова: ланцюг із обмеженням, засоби автоматизації, технічна система, стабілізація, автоматичне керування, математична модель, параметри.

Постановка задачі у загальному вигляді. Аналіз та синтез САУ з обмежувачем у об'єкті управління з відповідними показниками, з можливістю контролю параметрів періодичних рухів (коливань системи), визначенням динамічних характеристик за корисним сигналом є актуальним науковим завданням. Впровадження такої САУ є можливим напрямком удосконалення АСУ вогнем артилерії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз публікацій щодо інтеграції об'єкта ТЗ-ВЗ в автоматизовану систему управління вогнем артилерії свідчить про зростаючий інтерес до впровадження уніфікованих САУ в артилерійських системах. Останні дослідження підтверджують, що використання САУ може значно підвищити ефективність і точність стрільби, а також спростити процеси управління вогнем. Стаття [1] присвячена дослідженню можливостей впровадження САУ в артилерійських системах. Автори статті підкреслюють, що використання САУ може зменшити складність і вартість розробки артилерійських систем, а також покращити їх взаємодію з іншими системами. Публікація [2] присвячена розробці нових методів управління вогнем артилерії з використанням САУ. Автори статті пропонують новий підхід до управління вогнем, що базується на використанні САУ для координації дій

артилерійських підрозділів. Варто зауважити, що внаслідок швидкого розвитку нейромереж зростає зацікавленість щодо використання штучного інтелекту (ШІ) у бойових діях та в цивільному просторі [3]. Публікацію [4] присвячено розробці системи управління дронами з використанням ШІ. Автори статті підкреслюють, що використання ШІ може значно покращити ефективність і точність стрільби. Вцілому, аналіз останніх джерел свідчить про те, що інтеграція об'єкта ТЗ-ВЗ в автоматизовану систему управління вогнем артилерії є перспективним напрямком розвитку артилерійських систем. Використання САУ і ШІ може значно покращити ефективність і точність стрільби, а також спростити процеси управління вогнем.

Для створення уніфікованої системи автоматизованого управління керування об'єктом типу транспортний засіб – вогневий засіб потрібні виконавчі пристрої із ударними взаємодіями. Теорія створення систем з такими виконавчими пристроями об'єднує теорію коливань і теорію віброударних та віброзахисних систем. Багато досліджень присвячено вивченню цих систем [5, 6]. Окрема увага у теорії коливань механічних систем приділяється вивченню систем із зіткненнями та визначенню умов виникнення періодичних коливань різних типів [7, 8], розробці методики розрахунку періодичних режимів [9] та отриманню режимів з заданими параметрами [10], дослідженню біфуркацій руху [11] тощо. При цьому використовуються як точні, так і наближені методи [12].

Метою статті є розгляд варіанту системи автоматичного управління вогнем із новими принципами управління (з можливістю включення елементів штучного інтелекту для врахування стохастичних змін зовнішніх впливів) із реалізацією інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу та системи підтримки прийняття рішень.

Виклад основного матеріалу. Одним із пріоритетних напрямків розвитку Збройних Сил залишається вдосконалення систем бойового управління військами, включаючи модернізацію наявних засобів та систем подвійного призначення, впровадження нових систем і засобів автоматики та автоматизації управління військами та озброєнням із використанням досягнень у галузі інформаційних технологій.

Система управління вогнем (СУВ) або автоматизована система управління вогнем артилерії (АСУва) – автоматизована система, що об'єднує комплекс датчиків та технічних засобів, забезпечуючи пошук, виявлення та ідентифікацію цілей, а також підготовку системи озброєння до їх вогневого ураження, напрямку цілі та вирішення завдань враження цілі. Застосовуються на військових кораблях, підводних човнах, літаках, танках, самохідних артилерійських установках та комплексах ППО. У якості датчиків можуть використовуватись радары, інфрачервоні пристрої, лазерні далекоміри тощо. До складу системи управління вогнем також включаються приціли, а серед виконавчих пристроїв присутні стабілізатори озброєння, системи програмування та наведення керованої зброї.

Прикладами можуть служити прийняті на озброєння системи західних партнерів, зокрема автоматизована система управління (АСУ) вогнем польової артилерії ADLER (Artillerie Daten Lage Einsatz Rechnerverbund) та її модернізації ADLER II, АСУ вогнем мінометних підрозділів та реактивних систем залпового вогню DVA II (виробництва Німеччини), AFATDS (США), BATES (Великобританії) та ATLAS (Франції).

Не є винятком і системи, що використовуються на сході України в ході бойових дій на теперішній час. Прикладом системи, що реалізує автоматизацію процесу управління озброєнням, може бути програмний комплекс управління вогнем артилерії – ArtOS (Україна, місто Дніпро).

АСУв відповідного типу призначена для вирішення наступних основних завдань:

- координація дій засобів вогневого ураження із системами виявлення та супроводження цілей;
- оптимальний розподіл цілей;
- управління системами вогневої підтримки бойових дій з'єднань та частин з урахуванням складної тактичної обстановки або за попередньо спланованим сценарієм;

- автоматизована обробка та передача наказів та розпоряджень;
- визначення стану артилерійських систем, облік витрат та кількості боєприпасів;
- вибір оптимальних місць розташування систем артилерійської розвідки;
- управління та контроль за матеріально-технічним забезпеченням артилерійських підрозділів.

Модернізація існуючих засобів та систем, створення нових високомобільних артилерійських систем, дозволяє:

- здійснювати одночасне виконання багатьох вогневих задач;
- обмінюватися повідомленнями у цифровій формі;
- розгортати апаратуру та вогневі засоби на будь-якій транспортній базі.

У загальному випадку, це об'єднані в єдину мережу (систему) автоматизовані робочі місця, розташовані на командно-штабних машинах. Зв'язок між окремими (мобільними) компонентами системи здійснюється за допомогою засобів зв'язку короткохвильового та ультракороткохвильового діапазонів довжин хвиль. Обмін інформацією відбувається в автоматизованому режимі в реальному часі.

Спеціалізоване програмне забезпечення у системі управління вогнем дозволяє:

- проводити самостійний (незалежно від даних пункту управління вогнем) розрахунок та визначення налаштувань для пострілу;
- передавати повідомлення в ієрархічно структурованій мережі з численними користувачами (абонентами);
- забезпечувати доступ всіх користувачів (абонентів) за допомогою функціонально орієнтованої адресації;
- здійснювати управління пріоритетами та передачу повідомлень в режимі множинного доступу;
- організувати взаємодію з аналогічними АСУ збройних сил країн НАТО.

Розглянемо реалізацію подібних систем вітчизняними розробниками на прикладі програмного комплексу управління вогнем артилерії – ArtOS.

Застосування ArtOS значно скорочує час між моментом виявлення цілі та відкриттям вогню, а також усуває помилки при розрахунках. Такий комплекс здатний вирішувати 70% тактичних та бойових завдань, із якими стикається артилерія. Всі розрахунки відбуваються в автоматичному режимі і можуть бути дистанційно відправлені на артилерійський засіб.

Дані цілі, введені з планшету командира, з урахуванням метеорологічних та балістичних умов для націлювання вогневого засобу, отримують одночасно всі командири гармат та навідники батареї.

Комплекс зменшує час, який витрачається на ідентифікацію та ураження об'єкта, в чотири рази (до двох хвилин).

ArtOS складається з комунікаційних модулів Mikrotik, антен MIMO (Multiple Input – Multiple Output) та AirMax Omni, безпроводової точки доступу для зовнішнього застосування Rocket M, радіостанцій Motorola, які транслують зашифрований сигнал, планшетів Sigma x-treme PQ70 та блоків інформації для артилерійських установок, створених у програмному середовищі Noosphere Engineering School.

Ситуація, з якою зіткнулись Збройні Сили України під час бойових дій, обумовлює широке використання високомобільних транспортних засобів цивільного виробництва, на яких встановлені нетипові вогневі засоби. Переваги та недоліки таких систем розглянуті в навчальних і аналітичних матеріалах [13]. Експлуатація цивільних транспортних засобів у воєнних умовах, зокрема з встановленими на них військовими системами, породжує ряд технічних питань.

Важливі переваги такого підходу – це висока мобільність та низька вартість. Водночас, існують обмеження за бойовою потужністю та захистом особового складу, які слід враховувати при прийнятті тактичних рішень (при використанні системи).

До основних недоліків належать такі: відсутність відповідності конструкції транспортної бази до умов використання артилерійського озброєння; неможливість інтегрування подібних систем в єдину АСУ вогнем (зброю).

У [14] розглядається необхідність і можливість створення уніфікованої стабілізованої платформи під управлінням САУ. У такій системі передбачається автоматична компенсація деструктивного впливу на транспортну базу від застосування вогневого засобу. При цьому канал компенсації будується як упереджувальна система автоматизованого управління розімкненого типу. Величина та напрямок компенсаційного впливу визначається автоматично у відповідності до моделі підресорної частини транспортного засобу. Початковою (вхідною) інформацією для розрахунку напрямку та величини компенсаційного впливу є:

- тип транспортної бази (кінематична схема та параметри побудови підресорної частини);

- чисельне значення кута в азимутальній площині між напрямком ведення вогню та продольної вісі транспортної бази;

- чисельне значення кута ведення вогню в горизонтальній площині;

- технічні характеристики (параметри) вогневого засобу;

- характеристики механічної конструкції, реалізованої при встановленні вогневого засобу на уніфіковану платформу стабілізації (зсув центру ваги в горизонтальній та вертикальній площинах).

Побудова САУ, що складається лише з одного каналу управління, наведеного вище, не є доцільною. Така система (ТЗ-ВЗ) ефективна і здатна виконувати завдання як самостійна бойова одиниця. До складу обслуговуючого персоналу повинні входити (окрім водія) професійні артилеристи. Використання подібної системи в єдиній АСУв все ще буде ускладненим.

Для вирішення завдання інтеграції системи високомобільної транспортної бази цивільного виробництва – вогневий засіб (ТЗ-ВЗ) в єдину систему управління вогнем запропоновано додати ще три додаткові канали САУ замкнутого типу:

- 1) для автоматичного позиціонування уніфікованої платформи в азимутальній площині;

- 2) для автоматичного позиціонування вогневої системи в горизонтальній площині; в обох каналах передбачається можливість дистанційного керування (надходження керуючих сигналів від центру управління вогнем);

- 3) для стабілізації рухомої частини уніфікованої платформи в горизонтальній площині.

Оскільки цей процес відбуватиметься автоматично (без зовнішнього керування), обслуговуючий персонал позбавляється необхідності вибору горизонтальної поверхні для транспортного засобу перед веденням вогню.

Загальна структура системи управління об'єктом ТЗ-ВЗ наведена на рис. 1.

Блок датчиків об'єднує в собі вимірювальні та задаючі датчики всіх контурів керування САУ (інерційні вимірювачі, приймач супутникових сигналів системи GPS, статичні та динамічні датчики, датчики кутів тощо).

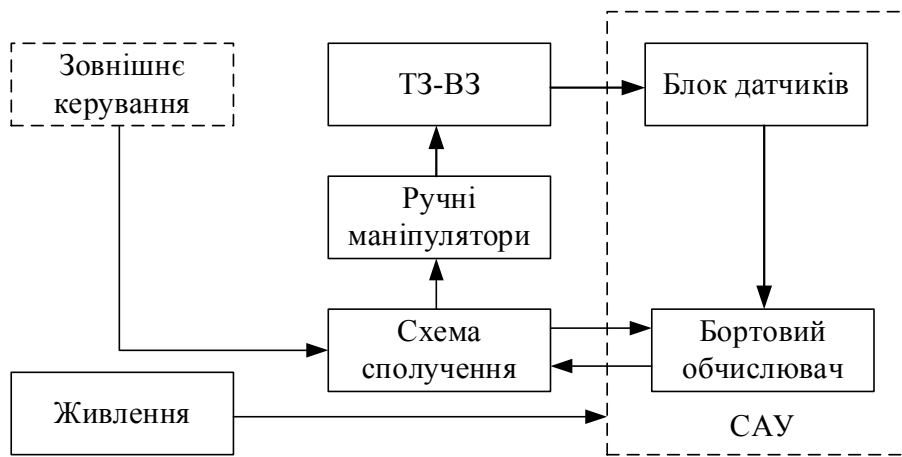


Рисунок 1 – Структура системи управління ТЗ-ВЗ

В якості бортового обчислювача може бути використано як одноплатний комп'ютер, так і прості мікропроцесорні системи. Перевага, не зважаючи на більші габарити та більше енергоспоживання, надається комп'ютеру. Це забезпечить більшу гнучкість використання та запас обчислювальної потужності.

У контурі стабілізації платформи з вогневим засобом можливо застосування ультразвукових висотомірів (малі габарити та енергоспоживання, незначна вартість).

Таким чином, САУ уніфікованої платформи ТЗ-ВЗ повинна включати в себе чотири контури автоматичного управління, три з яких замкнутого типу з регулюванням за зворотнім зв'язком (на рис. 2 показаний один з них), і роз'єднаного типу з параметрами управляючого впливу, отриманими за математичною моделлю, та виконавчим пристроєм з властивостями ланцюга з обмежувачем (ЛО).

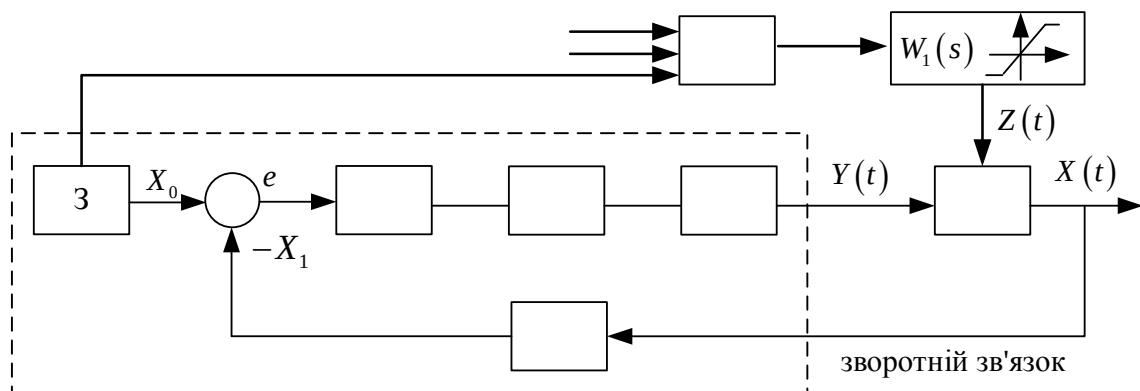


Рисунок 2 – Функціональна схема САУ

На схемі рис. 2 позначено: 3 – сигнал керуючої інформації (в аналоговому або цифровому вигляді) X_0 ; Д – датчик; Р – регулятор, ВП – виконавчий пристрій; ОУ – орган управління; О – об'єкт регулювання – уніфікована платформа; $Y(t)$ – управляючий вплив; $Z(t)$ – сигнал збудження від пострілу; $X(t)$ – параметр регулювання; X_1 – сигнал на виході датчика; $e = X_1 - X_0$ – похибка, що виникає при відхиленні параметра від завдання; ММ – математична модель підресорної частини транспортної бази; $W_1(s)$ – передаточна функція об'єкту (виконавчого приводу) з обмеженням.

Параметри контурів замкнутого типу визначаються виключно можливостями фізичної реалізації виконавчого пристрою (потужністю та запасом енергії на борту). Швидкодія (час перехідного процесу) в цих контурах відходить на другий план. На першому місці – відсутність перерегулювання та точність стеження. Для контурів регулювання введено обмеження:

- в азимутальній площині $(20 - 340)^{\circ}$;
- у кутомісній площині – $(0 - 80)^{\circ}$;
- для системи стабілізації платформи обмеження встановлюються в залежності від тактико-технічних характеристик транспортної бази. Максимальні кути регулювання не перевищують 15° в будь-якій площині.

В якості виконавчого пристрою контуру САУ розімкнутого типу для компенсації збуджувального впливу на транспортну базу розглядається виконавчий гідропривід. Використання гідроприводу обумовлено низкою особливостей функціонування механізмів у цьому контурі, а також характером впливу вогневого засобу під час застосування на підресорну частину транспортної бази. Цей вплив можливо характеризувати як ударний (одноразовий короткотривалий вплив значної інтенсивності).

На перше місце серед вимог до регуляторів у ньому віднесено швидкодію. Слід зауважити, що наявність гідроприводу дозволяє віднести САУ до класу систем з обмежувачем в об'єкті управління. Це випадок, коли завдяки конструктивним особливостям або фізичним властивостям об'єкту управління, вихід змінних станів за деякі межі принципово неможливий. Ланка, вихідна змінна якої має таку властивість, називають ланкою з обмежувачем (ЛО).

У приводах цього класу використовуються релейні закони управління, що пояснюється простотою виробництва та експлуатації релейних систем, а також можливістю отримання високих динамічних характеристик при малих габаритах і вазі керуючих пристроїв. Окрім релейних законів, в таких системах застосовують лінійні закони управління, які також володіють рядом позитивних властивостей.

Об'єкти з ЛО, є суттєво нелінійними, специфічними системами, а потреба врахування обмежувачів виникає при дослідженні багатьох технічних об'єктів. До них належать об'єкти з механічними обмежувачами, основною особливістю яких є наявність ударних взаємодій. Наявність ланок з ударними взаємодіями є характерною особливістю автоматичних (автоматизованих) систем. Ланки з механічними упорами входять до складу управляючих пристроїв газових та гідравлічних приводів стеження. При цьому для ряду систем (пропорційні приводи) ударні взаємодії вважають небажаними. В інших випадках (релеєві автоколивальні системи, системи з зовнішнім лінійаризуючим впливом) удари об обмежувачі становлять невід'ємну частину робочих процесів.

Процес удару розглядається як миттєва дія, яка впливає на зміни стану системи при незмінних інших координатах. Для опису ударної взаємодії використовується концепція Ньютона, яка використовує коефіцієнт пропорційності між швидкостями тіл, що рухаються, до і після удару.

У просторі стану системи можна виділити області, рухи в яких описуються різними диференціальними рівняннями. При переході з однієї області в іншу фазова траєкторія може залишатися неперервною (обмежувачі типу насичення) або зазнавати розриву (обмежувачі типу механічний опір). Таким чином, системи з обмежувачами описуються диференціальними рівняннями з розривними частинами, причому розривними можуть бути і фазові траєкторії.

Завдання дослідження систем з обмеженнями, розглянуті в теорії коливань, мають свою специфіку. У більшості випадків досліджуються вимушені або параметричні коливання роз'єднаних механічних систем. Найбільший інтерес представляє визначення амплітуди цих коливань. У конкретних задачах, застосовуючи точні методи, використовуються математичні моделі невисокого (2-го, 3-го) порядку. Щодо можливості використання наближених методів

можна, з деякими застереженнями, посилатися на точку зору Ю.І. Неймарка, який зауважував, що "...особливості динаміки систем із ударними взаємодіями роблять малопридатними застосування вивчених методів типу гармонічної лінеаризації, малого параметра і усереднення”.

Задачі дослідження систем автоматичного управління зазвичай відрізняються за змістом від задач теорії коливань. У них розглядаються закриті системи високого порядку, які, крім обмежувачів, мають інші нелінійності. Одержання періодичних рухів із заданими параметрами у цьому випадку є не лише необхідною, але й недостатньою умовою задоволення вимог, які висуваються до системи. Таким чином, при дослідженні систем автоматичного управління з обмежувачами відомі методи теорії коливань виявляються недостатніми.

Отже, синтез частини САУ з ЛО для системи ТЗ-ВЗ представляє собою актуальну наукову задачу, в якій поєднано наукові положення теорії коливань та теорії віброударних та віброзахисних систем.

Синтезу регуляторів стану (САУ) замкнених контурів приділяється значна увага в ряді джерел, а тому не викликає принципових труднощів. Вирішення цієї задачі значно спрощується при використанні сучасного програмного забезпечення, призначеного для автоматизації математичних та наукових розрахунків, наприклад, пакетів Mathematica, MathCAD, MATLAB, Maple.

При цьому система програмування MATLAB суттєво відрізняється від інших “математичних” пакетів наявністю в ній додатку для структурного математичного моделювання Simulink, інструментів, спеціально призначених для аналізу та синтезу лінійних систем автоматичного управління (Control System Toolbox) та розвиненої об’єктно-орієнтованої алгоритмічної мови, а також можливістю доступу до своїх функцій.

Таким чином, запропонована система (структура системи з регуляторами певних типів у різних каналах управління) у складі високомобільного транспортного засобу та нетипового вогневого засобу може бути інтегрована в єдину систему управління вогнем. При цьому, склад екіпажу (за необхідністю) може бути скорочений до однієї людини, завдання якої полягатиме в доставці транспортного засобу із зарядженим і готовим до застосування вогневим засобом до заздалегідь визначеного місця (позиції). Після прибуття екіпаж може бути приховано, а виконання бойового завдання (наведення, виконання стрільб, згортання) може бути виконано дистанційно та автоматично. Задачі проведення попередніх розрахунків з урахуванням географічних координат, вибір об’єкта ураження, час виконання стрільб, синхронізація з іншими подібними системами покладаються на центр прийняття рішень – центр управління.

Залежно від розв’язуваних задач та тактичної обстановки, систему ТЗ-ВЗ можна використовувати в сплячому режимі, а за необхідності – дистанційно знищити.

Висновки. Одним із напрямків створення (вдосконалення) АСУва є переобладнання уніфікованими засобами САУ широко застосовуваних на сьогодні у військах систем типу – високомобільна транспортна база цивільного виробництва з нетиповими вогневими засобами. Створення (синтез, адаптація, модернізація) системи автоматичного управління вогнем із новими принципами управління, елементами штучного інтелекту, з реалізацією інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу та системи підтримки прийняття рішень дозволяє суттєво скоротити час управління вогневими засобами та уникнути помилок операторів.

Наявність обмежувача в контурі системі управління суттєво впливає на її динамічні властивості. Представлення обмежувача безінерційним ланцюгом типу насичення призводить до значних похибок при вирішенні завдань аналізу та синтезу САУ, тому такий підхід є неприпустимий. Існуючі методи дослідження нелінійних систем у теорії автоматичного управління, в основному, передбачають наявність лише статичних нелінійностей, і їх застосовування до систем із обмежувачами на практиці дещо ускладнене.

Таким чином, незважаючи на значну кількість робіт, присвячених системам з ударними взаємодіями, наявні результати мають обмежене застосування до систем управління об'єктами з обмежувачами і не дозволяють вирішити ряд завдань, що виникають при їх дослідженні. Тому аналіз та синтез САУ з обмежувачем у об'єкті управління з відповідними показниками, з можливістю контролю параметрів періодичних рухів, визначенням динамічних характеристик за корисним сигналом є актуальним науковим завданням. Впровадження такої САУ є можливим напрямком удосконалення АСУва.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Bendersky, M., Raz, D. Artillery Firing Shift with Two Registration Targets. Military Operations Research Society Vol. 28, No. 4, 2023, pp. 23 – 38.
2. Рябих, В. Повелитель вогню – все про автоматизовану систему керування артилерійським вогнем TOPAZ. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/povelitel_vognju_vse_pro_avtomatizovanu_sistemu_keruvannja_artilerijskim_vognem_topaz-4554.html.
3. Hui, Liu. Investigation on Works and Military Applications of Artificial Intelligence. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9143084>.
4. Пилипів, І. Війну виграють технології. Як штучний інтелект допоможе перемогти у війні з РФ? [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.epravda.com.ua/publications/2023/12/4/707197>.
5. Симоновський, В.І. Коливання нелінійних систем. Суми: СумДУ, 1999. 131 с.
6. Воробьев, В.В., Киба, С.П., Самойлов, Н.Г. Колебания материальной точки. Кременчуг: КДПУ, 2000. 58 с.
7. Горошко, О.О., Дем'яненко, А.Г., Киба, С.П. Двохвильові процеси в механічних системах. К.: Либідь, 1991. 188 с.
8. Киба, С.П., Дем'яненко, А.Г. Узагальнення методу розділення змінних та деякі його застосування в механіці. К.: МВССО УРСР, НМК ВО, 1991. 120 с.
9. Назаренко, И.И. Прикладные задачи теории вибрационных систем. К.: ИСИО, 1993. 216 с.
10. Павловський, М.А. Теоретична механіка. К.: Техніка, 2002. 512 с.
11. Василенко, М.В., Алексейчук, О.М. Теорія коливань і стійкості руху. К.: Вища шк., 2004. 525 с.
12. Василенко, Н.В. Теория колебаний. К.: Вища шк., 1992. 430 с.
13. Кузавков, В.В., Поляк, І.Є. Аналіз транспортної бази для встановлення стабілізованої платформи нетипової артилерійської системи. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. Випуск № 50. Луцьк, 2023. 15-20 с.
14. Кузавков, В.В., Мацаєнко, А.М., Поляк, І.Є. Модель оцінки впливу вогневого засобу на підресорну частину транспортної бази. *Modern knowledge: research and discoveries*. Випуск № 40(183). Vancouver, Canada, 2023, pp. 600 – 610.

REFERENCES:

1. Bendersky, M. and Raz, D. (2023) Artillery Firing Shift with Two Registration Targets. Military Operations Research Society Vol. 28, No. 4, pp. 23 – 38.
2. Rjabykh, V. Povelytelj vognju – vse pro avtomatizovanu systemu keruvannja artylerijskym vognem TOPAZ. [Fire Lord - all about the TOPAZ automated artillery fire control system]. https://defence-ua.com/weapon_and_tech/povelitel_vognju_vse_pro_avtomatizovanu_sistemu_keruvannja_artilerijskim_vognem_topaz-4554.html.
3. Hui, Liu. Investigation on Works and Military Applications of Artificial Intelligence. [URL]: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9143084>.
4. Pylypiv, I. Vijnu vyghrajutj tekhnologhiji. Jak shtuchnyj intelekt dopomozhe peremoghty u vijni z RF? [Technology will win the war. How will artificial intelligence help win the war with the Russian Federation?]. <https://www.epravda.com.ua/publications/2023/12/4/707197>.
5. Symonovskij, V.I. (1999) Kolyvannja nelinijnykh system [Oscillations of nonlinear systems]. Sumy: SumDU. 131 p.

6. Vorobj'ev, V.V., Kyba, S.P. and Samojlov, N.G. (2000) Kolebanyja materyalnoj tochky [Oscillations of a material point]. Kremenchugh: KDPU. 58 p.
7. Ghoroshko, O.O., Dem'janenko, A.G. and Kyba, S.P. (1991) Dvokhvyljovi procesy v mekhanichnykh systemakh [Two-wave processes in mechanical systems]. K.: Lybidj. 188 p.
8. Kyba, S.P. and Dem'janenko, A.G. (1991) Uzaghaljnennja metodu rozdilennja zminnykh ta dejaki jogho zastosuvannja v mekhanici [Generalization of the method of separation of variables and some of its applications in mechanics.]. K.: MVSSO URSR, NMK VO. 120 p.
9. Nazarenko, Y.Y. (1993) Prykladnie zadachy teoryy vybracyonnykh system [Applied problems of the theory of vibration systems]. K.: YSYO. 216 p.
10. Pavlovskij, M.A. (2002) Teoretychna mekhanika [Theoretical mechanics]. K.: Tekhnika. 512 p.
11. Vasylenko, M.V. and Aleksejchuk, O.M. (2004) Teorija kolyvanj i stijkosti rukhu [Theory of oscillations and stability of motion]. K.: Vyshha shk.. 525 p.
12. Vasylenko, N.V. (1992) Teorija kolebanj [Theory of oscillations]. K.: Vyshha shk. 430 p.
13. Kuzavkov, V.V. and Poljak, I.Je. (2023) Analiz transportnoji bazy dlja vstanovlennja stabilizovanoji platformy netypovoji artylerijskoji systemy [Analysis of the transport base for the installation of a stabilized platform of an atypical artillery system]. Komp'juterno-integhrovani tekhnologhiji: osvita, nauka, vyrobnyctvo. Vypusk № 50. Lucjk, pp. 15-20.
14. Kuzavkov, V.V., Macajenko, A.M. and Poljak, I.Je. (2023) Modelj ocinky vplyvu voghnevogho zasobu na pidresornu chastynu transportnoji bazy [A model for assessing the effect of a fire agent on the spring-loaded part of the transport base]. Modern knowledge: research and discoveries. Vypusk № 40(183). Vancouver, Canada, pp. 600 – 610.

Dr. Tech. Sci. Prof. Kuzavkov V.V., Ph.D. Solodovnick V.I., Lapa V.I.

INTEGRATION OF V-F FACILITY IN AUTOMATED ARTILLERY FIRE CONTROL SYSTEM

Automated artillery fire control systems (ACSaf) play an important role in modern combat operations in the border regions of Ukraine. Such systems make it possible to significantly increase the effectiveness of the use of not only individual firearms, but also groups of such systems. Automation of the fire control process ensures prompt transfer (distribution and redistribution) of targets, which leads to an increase in the accuracy and efficiency of the actions of artillery units.

In practice, existing ACSaf have a number of disadvantages, such as complexity, cost, and long development times. The presence and use on the front of artillery systems developed in the last century and by different manufacturers makes it much more difficult (and sometimes impossible) to implement the ACSaf, due to the lack of unification and standardization of components.

One of the ways of development and improvement of ACSaf is the introduction of a unified system of automated control (SAC) of an object of the vehicle-firearm type (V-F). Such an automatic control system can be used as a basis for the development of new ACSaf, as well as for the modernization of existing ones.

The article examines the principles and tasks of ACS artillery fire, and also suggests the direction of their improvement with the help of V-F SAC.

In classic problems of the theory of automatic control, it is often necessary to take into account restrictions on state variables. The presence of such limitations is considered in the framework of two approaches. Restrictions can be considered as certain conditions, the fulfillment of which is not guaranteed by the physical properties of the object and must be ensured by a proper choice of management. In the second approach, constraints on the state variables are taken into account by introducing nonlinear static characteristics with saturation. At the same time, in the object model, restrictions are imposed not on the vector of state variables, but on the vector of their derivatives - input signals of individual links of the system. It is, in general, possible for the state variables to go beyond the limits defined by static nonlinearities.

Keywords: chain with limitation, means of automation, technical system, stabilization, automatic control, mathematical model, parameters.

УДК 004.94+004.056+658.5:159.953+612.821

ПРИГНІЧЕННЯ КОГНІТИВНИХ УПЕРЕДЖЕНЬ ПІД ЧАС ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОСОБИ ТА ЇЇ НАМІРУ В НЕЙРО-КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ

Дослідження присвячено проблемі безпеки інформаційних систем у випадку розпізнавання особи та її намірів за допомогою електроенцефалограми. Метод передбачено для неінвазивного нейрокомп'ютерного інтерфейсу, може застосовуватись при багаторівневих дослідженнях (емоційний інтелект, розвиток пам'яті, моніторинг самопочуття, оптимізація прийняття рішень), у чому полягає його перевага. Універсальність нейро-комп'ютерного інтерфейсу дозволяє використовувати його для кількох цілей одночасно, поєднуючи різні методи аналізу одного набору даних (енцефалограми, часу відповіді та адекватності). Запропоновано прикладний комбінований підхід до оцінки якості на основі проектних показників за результатами попередніх досліджень з урахуванням специфіки завдань і ролей користувачів, методів обробки даних, об'єктивності обраних моделей. Експерименти проводилися у змодельованих умовах у два етапи по 3 місяці за результатами тренування нейропластичності та вирішення завдань отримання доступу за наявності прав та в умовах непередбаченого запиту. Враховано індивідуальний стиль виконання завдань, а для прогнозування наміру застосовується стратегія розпізнавання емоцій за моделлю потоку Чиксентмігаї. Результати відповідають сучасним стандартам нейроетики та нейроправа. Когнітивні упередження можуть негативно вплинути на завдання ідентифікації людини та її намірів, для цього пропонуються методи пом'якшення. Зручність використання моделі полягає в простій інтерпретації зібраних даних. Для оцінки використано фронтальна альфа-асиметрія, потенціал пов'язаний з подією, відношення потужності смуги альфа-бета ритмів синхронізації. Результати переконують, що очікуване впровадження може бути ефективним. Робота враховує багатий досвід попередніх досліджень з ідентифікації особи та її намірів на основі аналізу електроенцефалограми. У цьому дослідженні враховано непостійність ЕЕГ образу («відбитку мозку») та акцентовано увагу на важливості його оновлення, проведено експеримент в ході комплексного дослідження. Результатом є обґрунтування вимог до частоти і процедури оновлення «відбитків мозку», запропоновані показники якості розпізнавання, пропозиції до ранжування рівня нейрограмотності на основі тестування типової діяльності. Для вивчення наміру особи запропоновано дослідження фонових когнітивних станів із врахуванням їх тривалості та інтенсивності типових зразків ритмів синхронізації, на основі яких проводилося машинне навчання моделі пригнічення когнітивних упереджень. Дані порівнювалися із моментами втрати контролю, було враховано потребу переосмислення та оновлення мереж синхронізації мозку. Ці результати наразі є базовими і в подальших експериментах вимагають окремої уваги, їх ґрунтовне дослідження буде важливим для покращення якості будь-яких досліджень застосування нейро-комп'ютерних інтерфейсів. Оцінено ризик небажаних когнітивних станів і появи когнітивних упереджень, передбачено вимоги до складання тестів з метою запобігання таким ситуаціям. Враховано вплив досвіду та рівня тренуваності нейрокомп'ютерної грамотності, індивідуальної придатності до роботи в нейро-комп'ютерних середовищах (зокрема потужність нейросигналу та володіння контролем ментальних зусиль, когнітивних властивостей і емоційних фонів).

Ключові слова: нейробезпека, неінвазивний нейрокомп'ютерний інтерфейс, ЕЕГ-ідентифікація наміру, пом'якшення когнітивних упереджень.

Вступ. Задача ідентифікації особи та її намірів стала типовою для безпеки систем із нейро-комп'ютерним інтерфейсом. Сьогодні зокрема виділяють поняття «відбиток мозку» (типовий ЕЕГ образ особи на основі середніх показників пластичності таких як вольтажі обраних ділянок та інтенсивність утримання цих значень протягом певного часу) та «відбиток розуму» (своєрідний стиль поведінки під час діяльності, визначається за співвідношенням часу реакції та точності відповідей із показниками когнітивних метрик

таких як зосередженість, заангажованість, стрес тощо). Залежно від типу пропонується структурний або функціональний підхід до проектування тестів, а також відповідні алгоритми збирання та обробки даних [1].

Із поширенням пристроїв із неінвазивним нейро-комп'ютерним інтерфейсом, особливо користувацького рівня, впровадженням моніторингу самопочуття та оптимізації прийняття рішень у бізнесі (США) і дослідження освітніх процесів (Китай), легітимізацією таких технологій для слідчої експертизи у досудовій практиці (Франція) стає помітним багатогалузевий вплив нейро-комп'ютерних інтерфейсів та постає логічне запитання про можливі подальші напрямки їхнього розвитку, методи використання і сфери впровадження.

Когнітивні упередження можуть значно погіршити результати розпізнавання особи. Тому пом'якшення когнітивних упереджень (mitigation of cognitive biases) є актуальною задачею в розробці протоколів безпеки інформаційних систем, а системи оснащені нейро-комп'ютерним модулем мають помітну перевагу у вирішенні цієї проблеми та застосування нової технології. Нейро-комп'ютерний інтерфейс, оснащений модулем виявлення небажаних когнітивних шумів, а далі - пригнічення когнітивних упереджень (така технологія може бути реалізована у моделі фільтра енцефалограми), дозволить оптимізувати процес ідентифікації, мінімізувавши небажані втрати часу та кількість помилок.

Аналіз останніх досліджень. У дослідженні [2] вчені продемонстрували, що електроенцефалографічні (ЕЕГ) сигнали можуть служити унікальними біометричними ідентифікаторами. Виявлено, що певні компоненти ЕЕГ, які ідентифікують особу, є стабільними в різних задачах та протягом часу. ЕЕГ сигнали дозволяють розрізнити навіть монозиготних близнюків, особливо, якщо використовуються дані з пізніше розвинених областей мозку.

У дослідженні [3] висвітлено метод порівняння амплітуд між півкулями мозку (Inter-Hemispheric Amplitude Ratio, IHAR), щоб розрізнити осіб за допомогою ЕЕГ на основі ідентифікації унікальних даних. Завдяки запропонованій функції можна досягти високої точності з малою кількістю сенсорів у простих завданнях. Перевагою підходу є можливість застосування для портативних пристроїв із вбудованими малопотужними мікропроцесорами. Також такий підхід забезпечує більшу зручність при навчанні системи, оскільки не потребує великої кількості навчальних зразків. У запропонованому підході найбільша точність була досягнута для двох фронтальних пар електродів — FC5-FC6 і F7-F8. Було визначено, що для збору даних ЕЕГ найкращим етапом відповідно до результатів була релаксація (точність 90%). Найбільш придатними алгоритмами машинного навчання для класифікації є QDA, SVM, kNN. Крім того, селективне розташування електродів AF3, AF4, F7 і F8 можна використовувати для розробки більш жорсткої апаратної конструкції з високою продуктивністю [1, 2, 4].

Когнітивні упередження, враховуючи специфічність їхнього впливу, можуть суттєво перешкоджати адекватній ідентифікації особи та її намірів, а також призводити до небажаних дій під час прийняття рішень, що в свою чергу може погіршити адекватність протоколу безпеки, робочого порядку і добробуту, самопочуття працівників. З цією метою пропонується використати модуль виявлення ризиків когнітивної упередженості та методи їх пом'якшення у системах з жорсткою умовою ідентифікації (обмежена кількість спроб і час для відповіді). Пропоную виділити три рівні нейрограмотності для цієї задачі: початковий рівень – відсутність досвіду, нетренованість стану контролю, рівень навчання – успішне оволодіння навичкою контролю зосередженості, придатність до використання ментальних команд, та рівень впевненої нейрограмотної особи, що визначається володінням базовим набором ментальних команд і добре розвиненим контролем власного ментального стану. Рівень визначається за типовим тестуванням та підвищується в ході навчання і тренувань [5-7].

Для оцінки ментального стану використовуються типові показники такі як смуги частот, фронтальна асиметрія, відношення потужності різних смуг та потенціал, пов'язаний із подією [2, 6, 8].

Перспективним напрямом розвитку технології є метод врахування когнітивних упереджень, за яким оцінені ризики або реальні прояви когнітивних упереджень фільтруються як небажаний артефакт при задачах ідентифікації особи та намірів.

Постановка задачі. Проблема ідентифікації особи за власним нейрообразом передбачає визначення права доступу користувача. Дану задачу можна сформулювати так: «Чи відповідає ЕЕГ метрика особи що здійснює дії нормальним зразкам?»

З цією метою протягом робочого часу збираються зразки із попередньо заданим вибором та інтервалами. Достатньо чотирьох-п'яти контрольних п'ятнадцятихвилинних тестів протягом нормального робочого часу (4-8 годин). Можливі комбінації таких показників як зосередженість, когнітивний стрес, частота кліпання очима, середній час реакції та точність відповідей (причому для подальшого порівняння амплітуд враховуються інтенсивності активації нейронних осередків правої та лівої півкулі мозку) [4, 9, 10].

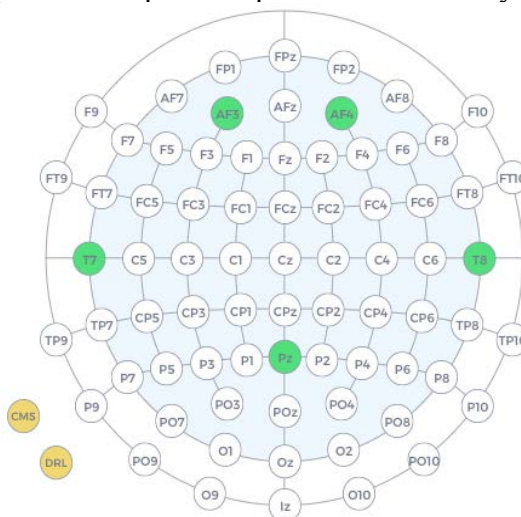


Рисунок 1 – Схема розташування електродів

Не менш важливою є проблема визначення наміру, яка досліджується в контексті розпізнавання емоцій та ментальних станів. Тут суттєвим є врахування відбитку розуму, який може певною мірою передати індивідуальність користувача.

Ця задача може бути сформульована у такому вигляді: «Чи припустимі наміри особи, яка 1) здійснює дію 2) отримує доступ або права?».

Задача може бути вирішена в межах перегляду емоційного стану особи в часовому околі виконання завдання або у момент здійснення дій.

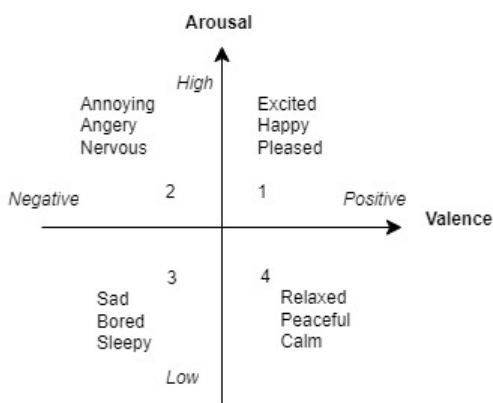


Рисунок 2 – Схема визначення наміру відповідно до емоційного стану

Можливою формою захисту системи є застосування блокування доступу або повторний запит ідентифікації. Технологія ментального паролю може бути запропонована як форма

ключа доступу. Для цього користувачу заздалегідь пропонують обрати варіант ментального завдання (зображення, 3-вимірний об'єкт, графічний ключ, математичний приклад, звукозапис, слово) та фіксують реакцію-відповідь (ментальне зусилля – зосереджена активація нейронних осередків, викликана означеним стимулом із визначеною унікальною відповіддю) (Рис. 3).

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводилось в імітованих умовах проектної діяльності. До уваги бралися показники ментального стану під час отримання доступу до захищеної інформації. В якості захисту пропонувалися паролі та прості ментальні образи. З метою підвищення якості захисту було використано алгоритм розпізнавання індивідуального нейрообразу особи на основі середніх показників типових артефактів: частота кліпання очима, релаксація, тривалість переосмислення, частота сонливості, а також типових робочих показників з точністю до визначеної похибки: зосередження, середні частоти стану бадьорості та свідомості, тривалість та інтенсивність ментального зусилля, тривалість та точність реакції тощо. Для підвищення якості результатів використано підхід порівняння середніх амплітуд активності правої та лівої півкуль мозку. Кінцеве оцінювання здійснено на основі суб'єктивного тестування із декларацією правдивості даних та експертних оцінок типових показників [3, 5, 10, 11].

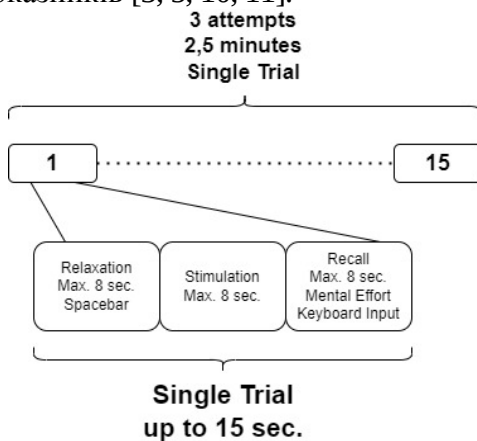


Рисунок 3 – Схема експерименту для збирання зразків

Середній час для одного етапу поліпшення нейропластичності становить 3 місяці. Ця стратегія навчання включає 4 заняття на тиждень по 30 хвилин. Два заняття з навчання грамотності НКІ включають 8 вправ, які базуються на завданнях, що розвивають пам'ять, сприйняття та контроль уваги. Проводяться дві професійні сесії в спеціальному середовищі для закріплення нових навичок у професійному розв'язанні проблем і стані трудової діяльності. Паралельні завдання для вдосконалення свідомого контролю включають розвиток психіки для підвищення емоційного інтелекту та редукції когнітивних упереджень (Табл. 1), [5, 12, 13].

Під час основної частини навчання проводилась якісна оцінка прийняття рішень у 30-хвилинних циклах професійної діяльності на різних етапах проекту, а також у непередбачуваних умовах.

Таблиця 1.

Забезпечення дослідження	
Робоче середовище	Microsoft Project, Visual Studio, Jupiter Notebook.
Роб. Станція	Dell Latitude 3570
Дослід. середовище	Emotiv LABS (навчання, тестування), EmotivPRO (збір даних), PsychoPy (додаткові тести).
Методи	EEG, ICA, SVM, P300, ERP
Вимоги до суб'єктів	II рівень нейрограмотності, досвід НКІ від 3 міс., хороша нейропластичність, всі темпераменти

При виборі електродів враховувалася оптимальність фіксації сигналів дієвих центрів (Табл. 2). Наявне устаткування дозволяє врахувати описані в методах вимоги до дослідження в межах запропонованих завдань.

Таблиця 2.

Когнітивні функції у відповідності до позицій електродів (система 10-20)	
Позиція	Функції
AF3	Аналіз, логіка, лічба
AF4	Прийняття рішень, увага
T7	Мовлення, слух
T8	Пам'ять
Pz	Сенсорика, просторова свідомість, зосередженість

Проблема когнітивної упередженості має наступний вираз: при підготовці до ідентифікації слід визначити чи високий ризик когнітивної упередженості в найближчий час, а під час ідентифікації – чи міг бути небажаний ментальний стан або рішення викликаний когнітивним упередженням. З метою оптимізації роботи системи пропоную вводити модуль ідентифікації когнітивної упередженості паралельно із модулем ідентифікації.

Додатково систему можна зміцнити інструментом транскраніальної магнето-резонансної томографії, що може пом'якшувати стан упередженості або активувати зосередженість чи необхідний нейтральний стан для осіб нижчого рівня нейрограмотності.

Дослідження ЕЕГ здійснюється за методикою вивчення потенціалу (активації) пов'язаного з подією (стимулом, ментальним зусиллям або станом).

Інтенсивність потенціалу активації оцінюється за діапазоном потужності ЕЕГ. Спектральний аналіз сигналу здійснюється за алгоритмом швидкого перетворення Фур'є, що дозволяє виділити ритми синхронізації дієвих нейронних осередків (Табл. 3). Таким чином можна отримати образ кожного слова (*когнеми* - за *Нейхгольтом А.*) перформансу (ментального зусилля, реакції, рішення) та оцінити *фон* ментального стану (емоції, зосередженість, релаксація) [14]. Часово-якісне співвідношення цих метрик та реакції відносно прийнятної точності дає уявлення про коректність вирішення задачі розпізнавання.

Таблиця 3.

Відповідність ритмів синхронізації когнітивним станам

ЕЕГ Ритм	Когнітивний процес/стан
Альфа (8-13 Гц)	зосередженість, свідомість, увага
Бета (13-30 Гц)	активне мислення, моторика, когнітивні завдання
Тета (4-7 Гц)	сонливість, запам'ятовування, творчість, фантазія
Дельта (0,5-4 Гц)	глибокий сон, відновлювальні процеси, формування спогадів, переосмислення

Вимога повторної ідентифікації висувається у випадку 1) невідповідності образу когнеми доступу нормальному, оновленому протягом останніх 48 годин значенню або 2) невідповідності даних когнітивних метрик типовим, зафіксованим протягом останніх 30-180 хв показникам.

Намір оцінюється як потенційно небезпечний, у випадку 1) відповідності когнітивних метрик небажаний локалізації (рис. 2, квадрант 2) та 2) при здійсненні дій непередбачених типовими інструкціями. Для виявлення цього стану використовуються методи аналізу

незалежних компонент та порівняння середніх амплітуд сенсорів різних півкуль (AF3 із AF4 та T7 із T8).

Результати експериментів та робочих досліджень оцінюються експертами, до уваги беруться також анкети суб'єктивного оцінювання. Оцінювання здійснюється за методом обґрунтування частки успішності дотримання показника відносно ідеального значення у відсотках. Кінцеві результати представлено у формі таблиці кореляції чинників [8, 15, 16].

Когнітивні метрики перформансу, які порівнюються при ідентифікації наміру особи. Когнітивний стрес часто є наслідком завдань, які вимагають постійної уваги та зосередженості, що призводить до розумової втоми. Стрес може спровокувати такі емоційні реакції, як тривога, розчарування або дратівливість, що впливає на виконання завдання. Стрес активує вісь гіпоталамус-гіпофіз-наднирники (НРА), що призводить до вивільнення кортизолу, гормону стресу. Стрес відображається на ЕЕГ-паттернах, таких як підвищення активності бета-хвиль (вказує на настороженість і тривогу) і зниження активності альфа-хвиль (вказує на розслаблення). Саме когнітивний стрес відповідає непевним намірам особи. Його надмірність може сприйматися як неприпустимий когнітивний стан та сприйматися системою як загроза. В такому випадку варто передбачити заходи захисту для протоколу безпеки такі як додаткова ідентифікація особи, уточнюючі запитання, перевірка робочого місця та звіт.

Когнітивний стрес оцінюється за спектральною густиною ЕЕГ сигналів, окремо для різних частот. Зростання густини різних частот зазвичай відповідає вищому когнітивному стресу [15].

$$P(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\pi f n / N} \right|^2 \quad (1)$$

де $P(f)$ – потужність частоти (f), (N) кількість зразків, $x(n)$ – значення ЕЕГ у мілівольтах. Частота дискретизації сигналу 0.5 Гц.

Потужність частоти сигналу (певного ритму ЕЕГ):

$$BP = \sum_{f_1}^{f_2} P(f), \quad (2)$$

де f_1, f_2 – крайні значення частоти смуги в Герцах.

Для оцінки когнітивного стресу використовують бета і гамма-частоти:

$$PSD_{\beta} = \frac{1}{N} \sum_{f=13}^{30} |X(f)|^2, \quad (3)$$

$$PSD_{\gamma} = \frac{1}{N} \sum_{f=30}^{50} |X(f)|^2. \quad (4)$$

Альтернативно можна оцінювати рівень когнітивного стресу за допомогою фронтальної альфа-асиметрії (Frontal Alfa Asymmetry). Цей показник базується на різниці альфа-потужності між лівою та правою лобовими частками. [16] Фронтальна асиметрія альфа-смуги використовується також для оцінки емоційного стану:

$$FFA = \log(\text{Power}_{\alpha, \text{right}}) - \log(\text{Power}_{\alpha, \text{left}}). \quad (5)$$

Потенціали, пов'язані з подіями (Event Related Potential, ERP) – це типові електрофізіологічні відповіді мозку у визначеному відчутті, когнітивному чи емоційному стані або моторного зусилля, що виникли під впливом певної спонуки, та були зафіксовані у визначених часово-потужнісних околах досліджуваної активності. Компонент P300, що виникає приблизно через 300 мс після початку стимулу, зазвичай використовується для оцінки уваги:

$$P300_{ampl.} = \max(ERP_{300ms}) - baseline. \quad (6)$$

Ці показники можна використати для ідентифікації особи за допомогою ментального ключа доступу для оцінки відповіді на стимул. У такому випадку оцінюються ментальні зусилля. Якщо відповідь типова – доступ надається, якщо ні – виконується протокол безпеки. Для ідентифікації особи можна використати дані навчання у типових професійних умовах та задачах, під час перерв та релаксації або отримання доступу [17],

$$\theta/\beta \text{ ratio} = \frac{Power_{\theta}}{Power_{\beta}}. \quad (7)$$

Спектральна густина тета-смуги дозволяє оцінити адекватність контролю. Саме ця частота є індикатором когнітивних упереджень, що можуть виникнути в процесі ідентифікації особи (фреймінг, парейдоля, прив'язка). Активація тета-частоти також може свідчити про розсіяність уваги [18],

$$PSD_{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{f=4}^8 |X(f)|^2. \quad (8)$$

Псевдокод прикладу розпізнавання наміру представлено у лістингу 1.

Лістинг 1. Псевдокод прикладу вивчення ЕЕГ даних особи в типовому завданні

```
import numpy as np
import mne
from scipy.signal import welch
import matplotlib.pyplot as plt

# Завантажити ЕЕГ
# Підтвердження вводу сирих даних
raw = mne.io.read_raw_fif('your_eeg_data.fif', preload=True)

# Задати спектр частот по смугах
theta_band = (4, 8)
beta_band = (13, 30)
alpha_band = (8, 12)

# Розрахувати спектральну гуштину частот за допомогою функцій Велча
def compute_psd(data, sfreq, band):
    freqs, psd = welch(data, sfreq, nperseg=1024)
    band_power = np.mean(psd[(freqs >= band[0]) & (freqs <= band[1])])
    return band_power

# Розрахувати відношення активації тета-бета частот
def theta_beta_ratio(data, sfreq):
    theta_power = compute_psd(data, sfreq, theta_band)
    beta_power = compute_psd(data, sfreq, beta_band)
    return theta_power / beta_power

# Розрахувати фронтальну асиметрію альфа-частоти
def frontal_alpha_asymmetry(data, sfreq, left_channels, right_channels):
    left_alpha_power = np.mean([compute_psd(data[ch], sfreq, alpha_band) for ch in left_channels])
    right_alpha_power = np.mean([compute_psd(data[ch], sfreq, alpha_band) for ch in
```

```

right_channels])
    return left_alpha_power - right_alpha_power

# Визначити канали для фронтальної альфа частоти
left_frontal_channels = ['AF3', 'T7']
right_frontal_channels = ['AF4', 'T8']

# Виділити епохи для нормального стану і спонук ідентифікації
events = mne.find_events(raw)
event_id = {'baseline': 1, 'stimuli': 2}
epochs = mne.Epochs(raw, events, event_id, tmin=-0.2, tmax=0.5, baseline=(None, 0),
preload=True)

# Розрахувати потенціал пов'язаний з подією (ідентифікаційною спонукую)
erp = epochs['stimuli'].average()

# Дослідити виділені епохи
baseline_data = epochs['baseline'].get_data()
stimuli_data = epochs['stimuli'].get_data()

# Дослідити дані непарного каналу
channel = 'Pz'
sfreq = raw.info['sfreq']

# Розрахувати відношення тета-бета смуг в підготовці та спонуці
baseline_theta_beta = theta_beta_ratio(baseline_data[:, raw.ch_names.index(channel), :], sfreq)
stimuli_theta_beta = theta_beta_ratio(stimuli_data[:, raw.ch_names.index(channel), :], sfreq)

# Розрахувати асиметрію фронтальної альфа частоти в підготовці та спонуці
baseline_alpha_asymmetry = frontal_alpha_asymmetry(baseline_data, sfreq,
left_frontal_channels, right_frontal_channels)
stimuli_alpha_asymmetry = frontal_alpha_asymmetry(stimuli_data, sfreq, left_frontal_channels,
right_frontal_channels)

# Вивести ERP
erp.plot()

print(f"Baseline Theta/Beta Ratio: {baseline_theta_beta}")
print(f"Stimuli Theta/Beta Ratio: {stimuli_theta_beta}")
print(f"Baseline Frontal Alpha Asymmetry: {baseline_alpha_asymmetry}")
print(f"Stimuli Frontal Alpha Asymmetry: {stimuli_alpha_asymmetry}")

```

Алгоритм пригнічення когнітивних упереджень при ЕЕГ ідентифікації особи та її наміру.

1. Завантажити дані ЕЕГ за розслабленого стану (baseline 30 с) на даний момент. Порівняти зі збереженими в базі даних за допомогою оцінки відношення смуг частот та фронтальної асиметрії.

2. Перевірити стан когнітивної упередженості особи. Якщо ризик вищий за допустимий – застосувати пом'якшення когнітивних упереджень.

3. Ввести умову ідентифікації (stimulus 15-150 с). Завантажити дані ЕЕГ та відповіді. Порівняти із типовими індивідуальними даними.

4. Якщо актуальні дані відповідають передбаченим показникам – продовжити. Дані оновити, ідентифікацію підтвердити. Якщо ні – перевірити ще раз. У випадку неспівпадінь – застосувати протокол безпеки.

5. (Додатково, для вищих рівнів захисту) Запропонувати елементарне когнітивне завдання на основі анкети професійної компетентності. Виміряти рівень володіння контролем уваги та ментального стану, оцінити нейрограмотність.

6. Якщо завдання виконані коректно – надати доступ. Якщо ні – запитати повторну ідентифікацію.

7. У разі повторного непроходження ідентифікації або недопустимості даних відповіді – застосувати протокол безпеки.

Псевдокод виконання алгоритму наведено у лістингу 2.

Лістинг 2. Псевдокод пригнічення когнітивних упереджень
під час ЕЕГ ідентифікації особи та її наміру

```
import mne
import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.metrics import classification_report, accuracy_score

# Завантажити ЕЕГ дані
def load_eeg_data(file_path):
    raw = mne.io.read_raw_fif(file_path, preload=True)
    return raw

# Препроцесінг ЕЕГ даних
def preprocess_eeg_data(raw):
    # Apply bandpass filter (0.1-40 Hz)
    raw.filter(0.1, 40, fir_design='firwin')

    # Apply notch filter to remove powerline noise (50 Hz)
    raw.notch_filter(50, fir_design='firwin')

    # Resample data to 200 Hz
    raw.resample(200, npad="auto")

    return raw

# Виділення епох довкола маркерів подій
def extract_epochs(raw, event_id, tmin=-0.2, tmax=0.5):
    events = mne.find_events(raw, stim_channel='STI 014')
    epochs = mne.Epochs(raw, events, event_id, tmin, tmax, baseline=(None, 0), preload=True)
    return epochs

# Виділення потужностей ритмів (смуги частот)
def extract_features(epochs):
    # Define frequency bands
    bands = {
        'delta': (1, 4),
        'theta': (4, 8),
```

```

    'alpha': (8, 12),
    'beta': (12, 30)
}

features = {}
for band, (fmin, fmax) in bands.items():
    power = mne.time_frequency.psd_welch(epochs, fmin=fmin, fmax=fmax, n_fft=256)
    features[band] = np.mean(power, axis=1)

return features

# Підготовка даних до навчання
def prepare_ml_data(features, labels):
    X = pd.DataFrame(features)
    y = pd.Series(labels)
    return train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# Тренування моделі
def train_evaluate_model(X_train, X_test, y_train, y_test):
    model = RandomForestClassifier(n_estimators=100, random_state=42)
    model.fit(X_train, y_train)
    y_pred = model.predict(X_test)
    print(classification_report(y_test, y_pred))
    print(f'Accuracy: {accuracy_score(y_test, y_pred)}')

# Головна функція обробки ЕЕГ та визначення когнітивних упереджень
def main(file_path, event_id, labels):
    raw = load_eeg_data(file_path)
    raw = preprocess_eeg_data(raw)
    epochs = extract_epochs(raw, event_id)
    features = extract_features(epochs)
    X_train, X_test, y_train, y_test = prepare_ml_data(features, labels)
    train_evaluate_model(X_train, X_test, y_train, y_test)

# Модуль пригнічення когнітивних упереджень
def preprocess_eeg(eeg_data):
    eeg_data = remove_artifacts(eeg_data)
    eeg_data = apply_bandpass_filter(eeg_data)
    return eeg_data

def extract_features(eeg_data):
    time_features = extract_time_domain_features(eeg_data)
    freq_features = extract_frequency_domain_features(eeg_data)
    spatial_features = extract_spatial_features(eeg_data)
    return concatenate_features(time_features, freq_features, spatial_features)

def mitigate_bias(features):
    normalized_features = normalize(features)
    adapted_features = domain_adaptation(normalized_features)
    return adapted_features

```

```

def train_model(features, labels):
    model = initialize_model()
    model = cross_validate(model, features, labels)
    return model

def identify_intention(eeg_data, model):
    preprocessed_data = preprocess_eeg(eeg_data)
    features = extract_features(preprocessed_data)
    mitigated_features = mitigate_bias(features)
    intention = model.predict(mitigated_features)
    return intention

# Main workflow
eeg_data = collect_eeg_data()
preprocessed_data = preprocess_eeg(eeg_data)
features = extract_features(preprocessed_data)
mitigated_features = mitigate_bias(features)
model = train_model(mitigated_features, labels)
intention = identify_intention(new_eeg_data, model)

# Приклад застосування
if __name__ == "__main__":
    file_path = 'path/to/eeg_data.fif'
    event_id = {'bias_event': 1} # Ідентифікація випадку когнітивного упередження
    labels = [0, 1, 0, 1, 0, 1] # Ознака (0: no bias, 1: bias)
    main(file_path, event_id, labels)

```

Висновки. Ефективність розпізнавання було оцінено за показниками точності та вчасності (відповідність образів за оптимальний час). Чинниками якості було визначено «нейрограмотність», «нейропластичність», «кількість учасників», «вік», «стать», «досвід», «складність завдання/стимулу», «темперамент учасника», «метод», «регулярність занять». Вища точність розпізнавання (85%) була досягнута у комбінації: «тип запиту доступу: Зд об'єкт», «тип підтвердження: ментальна команда (3 конфігурації із врахуванням послідовності)», «4 вправи тренування нейропластичності з метою умовної редукції когнітивних упереджень двічі на тиждень», «3 оновлення відбитка розуму на день двічі на тиждень», «метод порівняння середніх амплітуд потенціалів активації нейронних центрів різних півкуль».

	Нейрогр.	Нейропл.	Кількість	Вік	Стать	Досвід	Складн.	Темперам	Метод	Регулярн.
Нейрогр.	1,000	0,997	-0,943	0,789	0,834	0,999	-0,404	0,756	-0,660	-0,715
Нейропл.	0,997	1,000	-0,967	0,837	0,877	0,993	-0,327	0,807	-0,596	-0,655
Кількість	-0,943	-0,967	1,000	-0,948	-0,970	-0,932	0,077	-0,931	0,373	0,441
Вік	0,789	0,837	-0,948	1,000	0,997	0,768	0,243	0,999	-0,059	-0,134
Стать	0,834	0,877	-0,970	0,997	1,000	0,816	0,167	0,992	-0,136	-0,134
Досвід	0,999	0,993	-0,932	0,768	0,816	1,000	-0,434	0,734	-0,684	-0,737
Складн.	-0,404	-0,327	0,077	0,243	0,167	-0,434	1,000	0,294	0,954	0,929
Темперам	0,756	0,807	-0,931	0,999	0,992	0,734	0,294	1,000	-0,007	-0,082
Метод	-0,660	-0,596	0,373	-0,059	-0,136	-0,684	0,954	-0,007	1,000	0,997
Регулярн.	-0,715	-0,655	0,441	-0,134	-0,210	-0,737	0,929	-0,082	0,997	1,000

Рисунок 4 – Кореляція факторів якості ідентифікації особи та наміру в НКС за результатами експертного оцінювання

Нижча якість розпізнавання (68%) була у комбінації: «тип запиту доступу: слово» «тип підтвердження: акцент увагою (4 слова в довільній конфігурації)», «4 вправи тренування нейропластичності з метою умовної редукції когнітивних упереджень двічі на тиждень», «2 оновлення відбитка розуму на тиждень», «метод аналізу незалежних компонент» (Рис. 5).

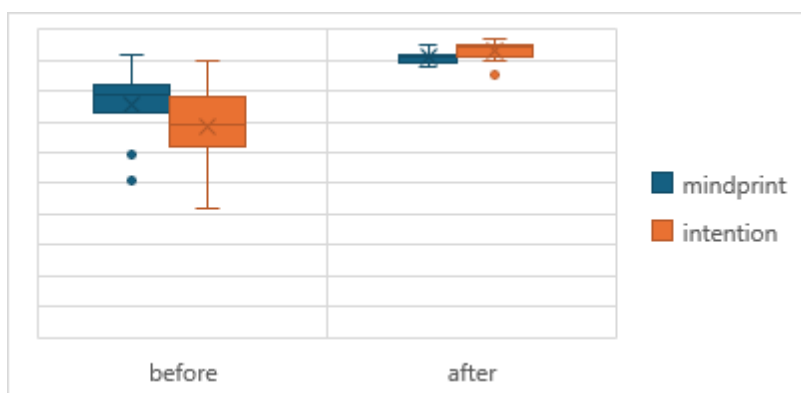


Рисунок 5 – Результуюча успішність ідентифікації за виконання модуля пом'якшення когнітивних упереджень в середньому на 8% вища ніж при звичній ідентифікації

Варто зауважити деякі несподівані результати, зокрема негативну кореляцію до регулярності тренувань. На початкових етапах або при високій частоті оновлення стимулу та умов виникає затримка реакції спровокована упередженістю знаннями та досвідом. У випадку скорочення кількості занять або запитів ідентифікації, нижчій частоті оновлення даних, знижується точність результатів через слабо треновану реакцію. Психологічна специфічність дослідження змушує зважати на високу негативну кореляцію із факторами ефекту спостереження: чим більше різних суб'єктів, тим нижча точність. Таку проблему наразі вирішують на етапі підбору кандидатів, обмежуючи вік від 30 до 50 років. Додатково варто звернути увагу на темперамент, включивши цей показник до обов'язкового тестування. Підбір завдань та розробка тестів, а також навчання суб'єктів мають високу позитивну кореляцію з якістю результатів розпізнавання.

Кількість суб'єктів залежить від кількості даних, які потрібно збирати. Для більшої кількості суб'єктів рекомендовано обмежувати кількість електродів та розробляти складніші завдання, збираючи більше даних. Відкритою проблемою розвитку технології також залишається очевидна непостійність та неоднозначність образів, що вочевидь зумовлено гендерно-віковою різницею учасників тестувань, емоційним контролем (темпераментом), ступенем нейрограмотності та нейропластичності, типовою діяльністю мозку (забування, нейровідновлення, синаптична еволюція та деградація), стресовістю умов та самопочуттям. Вирішення проблеми лежить у полі розробки складних алгоритмів із використанням кількох фільтрів.

Важливо також узгоджувати власні дані з клінічно та правово визначеними стандартами. Сьогодні задачі ідентифікації особи та наміру за допомогою нейро-комп'ютерних інтерфейсів вже застосовуються в експериментальних досудових розслідуваннях (Франція). У 2010 році такі техніки були введені в практику та легітимізовані 2014 [6, 7].

На точність може вплинути збільшення кількості суб'єктів. Крім того, шаблони сигналів мозку можуть суттєво змінюватися з часом, що впливає на продуктивність. Для продовження дослідження цей підхід можна додатково перевірити за допомогою системи ЕЕГ клінічного класу, і його слід дослідити, щоб перевірити, чи можна додатково зменшити кількість електродів.

Варто додати, що деякі пристрої вже дозволяють збирати інформацію впродовж тривалого часу із високою якістю. Наприклад, ЕЕГ-гарнітури як Emotiv MN8 Earbuds, що дозволяють фіксувати рівень уваги та стресу протягом користування. 2023 компанія Apple оголосила, що запатентувала нову гарнітуру Air Pods Sensor System із датчиками ЕЕГ. Система сенсорів

g.Pangolin дозволяє знімати ЕЕГ сигнал як мозку так і периферії. Перевагою є зручність використання протягом тривалого часу [8].

ЛІТЕРАТУРА:

1. Brunner, Clemens, et al. "BNCI Horizon 2020: Towards a Roadmap for the BCI Community." *Brain-Computer Interfaces*, vol. 2, no. 1, 2015
2. Yang, YY., Hwang, A.HC., Wu, CT. et al. Person-identifying brainprints are stably embedded in EEG mindprints. *Sci Rep* 12, 17031 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21384-0>
3. Jayarathne, I., Cohen, M., & Amarakeerthi, S. "Person identification from EEG using various machine learning techniques with inter-hemispheric amplitude ratio." *PLoS ONE*, vol. 15, no. 9, 2020, e0238872. DOI: 10.1371/journal.pone.0238872
4. López-Silva, Pablo, and Luca Valera, editors. *Protecting the Mind: Challenges in Law, Neuroprotection, and Neurorights*. Springer International Publishing, 2023.
5. Nam, Chang S., Anton Nijholt, and Fabien Lotte, editors. *Brain-Computer Interfaces Handbook: Technological and Theoretical Advances*. 1st ed., CRC Press, 2018.
6. Mykhalchuk V., Druzhynin V. Targeting mind in challenging conditions of biased nature of performance (preliminary results on individual experience). 1st international scientific and practical conference «Information Systems and Technology: Results and Prospects» (IST 2024)", Kyiv, 2024.
7. *Imagerie Cérébrale: Enjeux Épistémologiques, Éthiques Et Politiques*, Espace Ethique d'Ile de France, 2017. 97p.
8. Park Sang-Eon et al. Digital Assessment of Cognitive-Affective Biases Related to Mental Health. *PLOS Digital Health*, vol. 1, no. 1, 2024, article e0000595, <https://doi.org/10.1371/journal.pdig.0000595>.
9. Schreiner, Leonhard, et al. "Mapping of the Central Sulcus Using Non-Invasive Ultra-High-Density Brain Recordings." *Scientific Reports*, vol. 14, no. 6527, 19 Mar. 2024, doi:10.1038/s41598-024-57167-y.
10. Korteling, J. E., Gerritsma, J. Y. J., & Toet, A. (2021)1. Retention and transfer of cognitive bias mitigation interventions: A systematic literature study23. *Frontiers in Psychology*, 12, 629354. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.629354>
11. Mykhalchuk, V. "Cognitive Design of Educational Brain-Computer Interfaces." *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 3309, 2022, 1. DOI: 10.1007/978-3-319-64274-1_8.
12. Siritzky M. Emma. Standard Experimental Paradigm Designs and Data Exclusion Practices in Cognitive Bias Research. *Cognitive Research: Principles and Implications*, vol. 8, no. 1, 2023, article 520, <https://doi.org/10.1186/s41235-023-00520-y>.
13. Tmienova N., Mykhalchuk V. Brain-Computer Interface as Tool of Cognitive Optimization (Case of Biases Reducing in Decision-Making and Control Improvement). *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 3309, 2022, 1. DOI: 10.1007/978-3-319-64274-1_8.
14. A Review on Evaluating Mental Stress by Deep Learning Using EEG Signals. *Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference 'Information Systems and Technology: Results and Prospects' (IST 2024)*, 2024, pp. 45-56.
15. An Evaluation of Mental Workload with Frontal EEG. *PLOS ONE*, vol. 12, no. 4, 2017, article e0174949, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174949>.
17. *Mental Workload Monitoring: New Perspectives from Neuroscience*. *Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering*, edited by Hasan Ayaz and Umer Asgher, Springer, 2020, pp. 1-12, https://doi.org/10.1007/978-3-030-32423-0_1.
18. *Real-Time Mental Workload Estimation Using EEG*. *Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering*, edited by Hasan Ayaz and Umer Asgher, Springer, 2020, pp. 13-24, https://doi.org/10.1007/978-3-030-32423-0_2.

REFERENCES:

1. Brunner, Clemens, et al. "BNCI Horizon 2020: Towards a Roadmap for the BCI Community." *Brain-Computer Interfaces*, vol. 2, no. 1, 2015
2. Yang, YY., Hwang, A.HC., Wu, CT. et al. Person-identifying brainprints are stably embedded in EEG mindprints. *Sci Rep* 12, 17031 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21384-0>

3. Jayarathne, I., Cohen, M., & Amarakeerthi, S. "Person identification from EEG using various machine learning techniques with inter-hemispheric amplitude ratio." PLoS ONE, vol. 15, no. 9, 2020, e0238872. DOI: 10.1371/journal.pone.0238872
4. López-Silva, Pablo, and Luca Valera, editors. Protecting the Mind: Challenges in Law, Neuroprotection, and Neurorights. Springer International Publishing, 2023.
5. Nam, Chang S., Anton Nijholt, and Fabien Lotte, editors. Brain-Computer Interfaces Handbook: Technological and Theoretical Advances. 1st ed., CRC Press, 2018.
6. Mykhalchuk V., Druzhynin V. Targeting mind in challenging conditions of biased nature of performance (preliminary results on individual experience). 1st international scientific and practical conference «Information Systems and Technology: Results and Prospects» (IST 2024)", Kyiv, 2024.
7. Imagerie Cérébrale: Enjeux Épistémologiques, Éthiques Et Politiques, Espace Ethique d'Ile de France, 2017. 97p.
8. Park Sang-Eon et al. Digital Assessment of Cognitive-Affective Biases Related to Mental Health. PLOS Digital Health, vol. 1, no. 1, 2024, article e0000595, <https://doi.org/10.1371/journal.pdig.0000595>.
9. Schreiner, Leonhard, et al. "Mapping of the Central Sulcus Using Non-Invasive Ultra-High-Density Brain Recordings." Scientific Reports, vol. 14, no. 6527, 19 Mar. 2024, doi:10.1038/s41598-024-57167-y.
10. Korteling, J. E., Gerritsma, J. Y. J., & Toet, A. (2021)1. Retention and transfer of cognitive bias mitigation interventions: A systematic literature study23. Frontiers in Psychology, 12, 629354. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.629354>
11. Mykhalchuk, V. "Cognitive Design of Educational Brain-Computer Interfaces." CEUR Workshop Proceedings, vol. 3309, 2022, 1. DOI: 10.1007/978-3-319-64274-1_8.
12. Siritzky M. Emma. Standard Experimental Paradigm Designs and Data Exclusion Practices in Cognitive Bias Research. Cognitive Research: Principles and Implications, vol. 8, no. 1, 2023, article 520, <https://doi.org/10.1186/s41235-023-00520-y>.
13. Tmienova N., Mykhalchuk V. Brain-Computer Interface as Tool of Cognitive Optimization (Case of Biases Reducing in Decision-Making and Control Improvement). CEUR Workshop Proceedings, vol. 3309, 2022, 1. DOI: 10.1007/978-3-319-64274-1_8.
14. A Review on Evaluating Mental Stress by Deep Learning Using EEG Signals. Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference 'Information Systems and Technology: Results and Prospects' (IST 2024), 2024, pp. 45-56.
15. An Evaluation of Mental Workload with Frontal EEG. PLOS ONE, vol. 12, no. 4, 2017, article e0174949, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174949>.
17. Mental Workload Monitoring: New Perspectives from Neuroscience. Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering, edited by Hasan Ayaz and Umer Asgher, Springer, 2020, pp. 1-12, https://doi.org/10.1007/978-3-030-32423-0_1.
18. Real-Time Mental Workload Estimation Using EEG. Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering, edited by Hasan Ayaz and Umer Asgher, Springer, 2020, pp. 13-24, https://doi.org/10.1007/978-3-030-32423-0_2.

SUPPRESSION OF COGNITIVE BIASES IN OF A PERSON AND HIS INTENTION IDENTIFICATION TASK FOR NEURO-COMPUTER SYSTEMS

The study is devoted to the problem of security of information systems in the case of recognition of a person and his intentions using an electroencephalogram. The method is designed for a non-invasive neurocomputer interface, can be used in multi-level research (emotional intelligence, memory development, monitoring well-being, optimization of decision-making), which is its advantage. The versatility of the neuro-computer interface allows you to use it for several purposes at the same time, combining different methods of analysis of one data set (encephalogram, response time and adequacy). An applied combined approach to quality assessment based on design indicators based on the results of previous studies, taking into account the specifics of user tasks and roles, data processing methods, and the objectivity of the selected models, is proposed. The experiments were carried out in simulated conditions in two stages of 3 months each based on the results of neuroplasticity training and solving tasks of obtaining access in the presence of rights and in the conditions of an unexpected request. The individual style of performing tasks is taken into account, and the emotion recognition strategy based on the Chikszentmihalyi's model is used to predict the intention. The results meet modern standards of neuroethics and neurolaw. Cognitive biases can negatively affect the task of identifying a person and his intentions, for this, mitigation methods are proposed. The ease of use of the model lies in the simple interpretation of the collected data. Frontal alpha asymmetry, event-related potential, and alpha-beta band power ratio of synchronization rhythms were used for assessment. The results are convincing that the expected implementation can be effective. The work takes into account the rich experience of previous research on the identification of a person and his intentions based on the analysis of the electroencephalogram. In this study, the impermanence of the EEG image ("brain imprint") is taken into account and attention is focused on the importance of its renewal, an experiment was conducted in the course of a comprehensive study. The result is a substantiation of requirements for the frequency and procedure of updating "brain prints", proposed indicators of the quality of recognition, proposals for ranking the level of neuroliteracy based on testing typical activities. In order to study the intention of a person, it is proposed to study the background cognitive states, taking into account their duration and intensity of typical patterns of synchronization rhythms, on the basis of which machine learning of the cognitive bias suppression model was carried out. Data were compared with moments of loss of control, the need to rethink and update brain synchronization networks was taken into account. These results are currently basic and require special attention in further experiments, their thorough investigation will be important for improving the quality of any research on the use of neuro-computer interfaces. The risk of unwanted cognitive states and the appearance of cognitive biases has been assessed, and requirements for taking tests are provided to prevent such situations. The influence of experience and training level of neurocomputer literacy, individual suitability to work in neuro-computer environments (in particular, neurosignal power and control of mental efforts, cognitive properties and emotional backgrounds) are taken into account.

Key words: neurosecurity, non-invasive neurocomputer interface, EEG-identification of intention, mitigation of cognitive biases.

АНАЛІЗ І ОЦІНКА ФУНКЦІОНУВАННЯ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ ЗАВАДОВОЇ ОБСТАНОВКИ ТА КІБЕРВПЛИВУ

У статті здійснено аналіз сучасних сенсорних мереж і розглянуто базові принципи побудови та застосування у системах військового призначення. Особлива увага приділена бездротовим сенсорним мережам (БСМ), як перспективної технології, для реалізації важливого напрямку воєнної політики.

Це стало можливим завдяки мініатюризації компонентів та зростанню потужності обчислень. Сенсорні мережі, складаються з великої кількості малопотужних багатофункціональних пристроїв, які розгортаються в певній географічній зоні. Хоч більшість з елементів такої мережі мають обмежені фізичні ресурси, об'єднані разом, вони швидко конфігуруються до виконання цілого ряду функціональних завдань захисту критичної інфраструктури та моніторингу навколишнього середовища тощо. Однак з розвитком та трансформацією все активніше досліджується й питання інформаційної безпеки, оскільки ризики несанкціонованого доступу або втручання можуть серйозно підірвати ефективність і надійність цих технологій. Слід зауважити, що саме через відкрите середовище передачі інформації, необхідно здійснювати оновлення методів шифрування та автентифікації

Запропоновано опис особливостей функціонування сенсорних мереж в умовах завадової обстановки та кібервпливу, застосування їх в якості високоефективних і перспективних рішень в системі збору інформації. Можливість розгортання мережі в складних умовах, відсутність провідних комунікацій і мінімальні розміри сенсорних пристроїв роблять технологію сенсорних мереж надзвичайно гнучкою і практичною. Вона передбачає максимальне використання інформаційних систем, що надають доступ до інформації в будь-який час незалежно від місцезнаходження користувача.

Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, координатор мережі, датчики, маршрутизатори, інформаційні системи.

Вступ та постановка проблеми.

Стратегічним оборонним бюлетенем України, схвалено що одним із першорядних напрямів реалізації воєнної політики України є побудова системи об'єднаного керівництва силами оборони та військового управління у Збройних Силах України відповідно до передового досвіду, принципів і стандартів держав-членів НАТО [1]. Для реалізації важливого напрямку воєнної політики, доцільно максимально використати основні функції інформаційних систем, що надають доступ до інформації в будь-який час незалежно від місцезнаходження користувача. Завдяки цьому виникає необхідність застосовувати системи зв'язку для безперебійного обміну інформацією, своєчасної передачі наказів, розпоряджень, що забезпечить якісне та безперебійне управління військовими підрозділами.

Збір, оцінка і передача інформації є життєво важливими під час ведення бойових дій. Дані сенсорів, забезпечують точку входу для тих, хто може захотіти втрутитися в сприйняття військового персоналу і командирів, вставляючи неправдиві дані або взагалі відключаючи ці дані в рамках плану обману.

Кожна одиниця військової техніки має свій слід. Він може бути візуальним, звуковим або електромагнітним. Він може мати всі ці ознаки, а також володіти такими ознаками, як

вихлопні гази транспортних засобів чи літаків. Військові підрозділи різного масштабу також мають характерні ознаки. Основна ідея полягає у використанні сенсорних мереж і датчиків,

які дозволяють виявити зазначені сліди військової діяльності і проінформувати командирів про виявлені ознаки.

Протягом багатьох років армії Заходу прагнули такого способу ведення війни, де б сукупність «датчиків» – відеокамер, тепловізорів, радіоантен тощо – виявляла цілі, передавала дані найкращому «стрільцю» – гаубиці, ракеті чи військовому кораблю, – і в такий спосіб утворювався б «ланцюг знищення» або ж, як зараз кажуть, «павутина знищення» безпрецедентної швидкості та ефективності.

Радіо, комп'ютерні мережі, супутникові сузір'я і наземні станції, технології шифрування, штучний інтелект і високопродуктивні обчислення – ось деякі з технологій, які зараз інтегровані в сенсорні та комунікаційні мережі.

На сьогодні, однією із технологічних інновацій є штучний інтелект (ШІ). Його розвиток та активне впровадження, здається, не минули жодну сферу життя людини. Проте для армій, особливо західних демократій, штучний інтелект уже не новинка. У низці оборонних відомств департаменти давно розвивають та впроваджують ШІ. Для українських Сил оборони розвиток систем машинного навчання тільки починається. Тим не менш, в зоні бойових дій вже існують зразки озброєння, які працюють за допомогою ШІ. Одного дня їх кількість та системний вплив можуть стати настільки вагомими, що дозволить переломити позиційну форму війни.

В умовах активних боїв головним завданням для українських розробників є забезпечення ШІ-рішень для фронту. Одним з них є система Griselda, яка використовує ШІ для збору розвідувальних даних і підвищення ситуаційної обізнаності військ. Вона здатна обробляти тисячі повідомлень із супутників, безпілотників, соцмереж, ЗМІ та зламаних баз даних ворога [<https://www.griselda.com.ua/>].

Griselda за місяць обробляє понад 25 тис цілей, а рекорд за часом з моменту отримання інформації про ворога до її появи в системі становив 28 сек. Технологія інтегрована із системою ситуаційної обізнаності Delta, застосунками для артилеристів і танкістів "Броня", "Кропива", "Укроп" та "ГісАрта".

Аналіз досліджень та публікацій. Нові можливості сенсорних мереж при виконанні складних, стратегічних завдань, дають змогу спостерігати, за бойовими цілями, фіксувати їх у просторі та передавати розвідувальну інформацію для планування бойових дій [2].

У роботі [4], проведено аналіз завдань управління сенсорними мережами, а також запропоновано функціональну модель системи управління сенсорною мережею, обґрунтовані принципи її побудови, структура та функції. У статті [7] розглядаються перспективи розвитку тактичних сенсорних мереж, здійснено класифікацію і вимоги, що висуваються до них. Крім того, стаття містить результати аналізу проблем розроблення таких мереж і їх розвитку в сучасних умовах. У дослідженні [3] виконано аналітичний огляд сучасних наукових праць стосовно стану мобільних бездротових сенсорних мереж (далі – БСМ), а також надано загальне визначення бездротових сенсорних мереж з мобільними сенсорами та наводиться класифікація їхньої архітектури.

Побудові технічних засобів виявлення різноманітних датчиків сенсорних мереж присвячена багато робіт науковців: О.В. Барабаша, Ю.О. Гордієнко, С.В. Дзядевич, А.А. Євтух, Я.І. Лепіх, В.Г. Мельник, В.А. Мокрицький, О.В. Селюков. [8,9].

Побудовою, розгортанням сенсорних мереж, а також кодуванням даних досліджували науковці, серед яких: А.О. Дружинін, О.В. Жук, С.В. Ленков, В.О. Романов, В.А. Романюк та інші [11,12].

Вчені звертають увагу на можливість проектування та оптимізації складних технічних систем залежно від наступних показників: обраного показника якості, середнього часу

затримки повідомлення в мережі, надійності елементів системи та вартості проектування системи. На теперішній час значні зусилля спрямовані на проблему життєздатності і надійності мереж для збереження здатності виконувати базові функції навіть під впливом дестабілізуючих факторів та в умовах кібервпливу.

Таким чином, враховуючи особливості будови та експлуатації бездротових сенсорних мереж виникає необхідність забезпечення: сталого функціонування бездротових сенсорних мереж в умовах складної задової обстановки; можливостей захисту від кібервпливів в процесі подальшого відновлення функціонування.

Метою статті є аналіз особливостей функціонування і прикладного застосування бездротових сенсорних мереж, а також реалізації необхідних заходів безпеки при функціонування в умовах задової обстановки та кібервпливу.

Викладення основного матеріалу. Процес вистежування бойових цілей, їх фіксування у просторі та передача розвідувальних даних про противника, став невід'ємною основою для планування та виконання заходів по відбиттю агресії, яка викликана прямим застосуванням збройних сил російською федерацією проти України.

Використання сенсорних мереж у військовій сфері, обумовлена необхідністю виконувати базові функції під впливом дестабілізуючих факторів, при складній задовій обстановці та в умовах кібервпливу.

Одним із варіантів для вирішення завдань наземної розвідки є розгортання сітчастих сенсорних мереж.

Можна запропонувати наступну систему організації сітчастих сенсорних мереж, що складаються з шести елементів, кожен з яких все більше спирається на підтримку штучного інтелекту:

- сенсорні елементи, які збирають дані про те, що відбувається;
- елемент зв'язку, який передає інформацію між системами та операторами;
- елемент безпеки, який гарантує, що дані, а також лінії зв'язку, які з'єднують датчики та аналітиків, захищені від підробки, пошкодження або крадіжки даних;
- елемент/елементи обробки, які агрегують і аналізують дані з багатьох джерел для прийняття рішень;
- елемент прийняття рішень, на сьогодні людський, де інформація перетворюється на дію;
- компонент впливу, де інформація і рішення перетворюються на кінетичні та некінетичні ефекти на полі бою або в інших стратегічних заходах.

Одним із ключових наслідків цього є інтеграція різних сфер у спільних операціях, краща взаємодія і синтез військової та невійськової діяльності у загальнонаціональній структурі.

Така будова сенсорної мережі дозволяє виявляти розташування людей на підконтрольній території, вистежування їх переміщення, а також здійснювати моніторинг екології, погоди, обстановки, а головне сприяє запобіганню втрат серед особистого складу під час вирішення бойових завдань.

Термін «сенсорна мережа» (Sensor Network), з'явившись порівняно недавно, але є вже досить усталеним поняттям, що характеризується, стійкістю до відмови окремих елементів мережі. Мережа складається із великої кількості, компактних і дешевих напівпровідникових пристроїв, що об'єднані між собою бездротовим зв'язком. Елементи мережі не обслуговуються і не вимагають спеціальної установки. Кожен вузол мережі може містити вбудовані датчики фізичних параметрів навколишнього середовища, наприклад, руху, рівня вологості повітря, світла, температури, тиску тощо, а також мікросхеми для первинної обробки інформації і зберігання отриманих даних.

Для протидії новим сенсорним технологіям необхідно буде розробити нові види адаптивного камуфляжу, зміни форми транспортних засобів, кібернетичної війни і перешкод.

Загалом, бездротову сенсорну мережу можна охарактеризувати як мережу сенсорів, які спільно контролюють навколишнє середовище та збирають інформацію. Ці мережі забезпечують взаємодію між людьми або комп'ютерами та навколишнім середовищем [3, 4]. Існує три типи пристроїв, які утворюють бездротову сенсорну мережу [5]. Сюди входить координатор мережі (КМ) – у будь-якій мережі може бути лише один. Він розташований у корені дерева мережі. Наступний пристрій – це вузли датчиків або FFD (Fully Function Device – пристрій з повним набором функцій). Вони повністю функціональні і можуть функціонувати як маршрутизатори. Найменші – це сенсори або RFD (Reduced Function Device – пристрій з обмеженим набором функцій). Вони є кінцевими пристроями і не можуть бути маршрутизаторами (рис. 1).

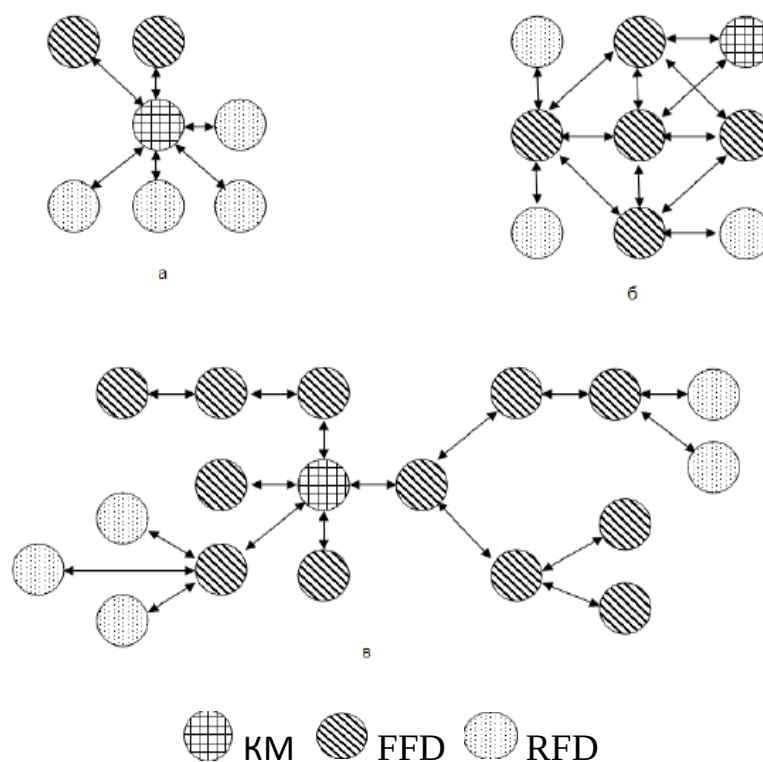


Рисунок 1- Приклади топологій сенсорних мереж

Велика кількість датчиків, випадковим чином розташованих всередині контрольованої зони або поблизу неї, утворюють мережі на основі використання функції самоорганізації. Основним завданням датчиків є контроль фізичних параметрів середовища та передача інформації до інших датчиків за допомогою послідовного методу передачі. Тобто вузли сенсорної мережі є одночасно передавачем і приймачем.

Протягом періоду передачі, дані можуть оброблятися кількома датчиками, щоб перейти до вузла шлюзу після багато каскадної маршрутизації і, нарешті, досягти датчика управління. Користувач здійснює конфігурацію та управління БСМ за допомогою блоку управління. Він встановлює завдання моніторингу та збирає контрольовані дані [6].

Розглядаючи заходи технічного захисту інформації, що циркулює в бездротовій сенсорній мережі, необхідно виявити потенційні загрози безпеці, які поділяються на внутрішні та зовнішні.

До внутрішніх факторів відносяться ненавмисні помилки викликані неправильним налаштування пристроїв, помилки в обслуговуванні або управлінні мережами, збої в живленні, недоліки в програмному забезпеченні, кліматичні умови.

Оскільки БСМ часто розгортаються в неконтрольованих або незахищених фізичних умовах, важливо окремо приділити увагу впливу атак і загроз на вузли та сенсори мережі. Виток інформації через фізичний доступ до вузлів може знищити цілісність і конфіденційність даних, що обробляються. Це ставить під загрозу не тільки окремі компоненти мережі, але й загальну безпеку системи в цілому [7]

До зовнішніх факторів слід віднести фактори штучного впливу такі як DDoS-атаки, MITM-атаки пов'язані з перехопленням та модифікацією даних, що передаються між пристроями. Також противник може здійснювати перехоплення і підробку сигналів змінюючи цілісність інформації або використовувати потужні джерела радіохвиль на тих же частотах, що й мережа, для створення завад у передачі даних.

Розглянемо можливі заходи для захисту сенсорної мережі військового призначення від зовнішніх факторів.

Першим і дуже ефективним способом протидії зовнішнім факторам у бездротовій сенсорній мережі датчиків розвідувального призначення є використання шифрування даних (наприклад AES) для захисту інформації, що передається. Використання нових підходів в методах шифрування, а також покращенні наявних алгоритмів безпеки на мережевому рівні може допомогти уникнути підміни даних маршрутизації та забезпечити додаткову цілісність і конфіденційність даних, тим самим успішно протидіяти атакам типу Black Hole і Selective Forwarding [8].

Також доцільно використовувати потенціал штучного інтелекту (ШІ) для організації кіберзахисту. Системи ШІ мають здійснювати постійний моніторинг трафіку для виявлення аномалій, що можуть вказувати на атаки. Це дасть змогу виявити уразливі місця та виконати певні дії, необхідні для самостійного виправлення. Якщо врахувати високу швидкість, необхідну для проведення будь-якої кібер-операції, очевидно, що тільки механізми ШІ здатен ефективно реагувати на початкових стадіях серйозних кібер-атак. Таким чином, ШІ може впоратися із недоліками традиційних інструментів кібербезпеки. Інший аспект, що має значення для побудови систем кібербезпеки із застосування ШІ – у майбутньому може бути залучений у квантових обчисленнях або високопродуктивних комп'ютерах [9,10].

Крім можливостей ШІ також треба використовувати традиційні інструменти кібербезпеки такі як системи виявлення вторгнень (Intrusion Detection System, IDS), система запобігання вторгнень (Intrusion Prevention System, IPS), система захисту кінцевих точок (Endpoint Detection and Response, EDR), система управління інформацією і подіями безпеки (Security Information and Event Management, SIEM) [11]. Їх можливості по виявленню та моніторингу вхідних подій у мережі, таких як нові підключення, потенційні проблеми або незвична активність дають уявлення фахівцю з кібербезпеки своєчасно відстежувати події, виявляти потенційні загрози та реагувати на них [12].

Також необхідно передбачити застосування механізмів автентифікації для підтвердження ідентичності пристроїв у мережі, а також здійснення автентифікації даних, що забезпечує достовірність повідомлень шляхом ідентифікації його походження. Противник не обмежується лише зміною пакета даних. Він може змінити весь пакетний потік, ввівши додаткові пакети. Тому одержувачу необхідно забезпечити, щоб дані, які у будь-якому процесі прийняття рішень, виходили з правильного джерела. З іншого боку, при побудові мережі датчиків автентифікація даних дозволяє одержувачу перевірити, чи дані відправлені заявленим відправником. У разі двостороннього зв'язку автентифікація даних може бути досягнута за допомогою суто симетричного механізму: відправник та одержувач

спільно використовують секретний ключ для обчислення коду автентифікації повідомлення всіх переданих даних [13].

Управління ключами в БСМ є достатньо складним завданням через значну кількість вузлів та обмежені ресурси кожного з них. Розробка механізмів розподілу та оновлення ключів, які адаптуються до змін у топології та управлінню вузлами, є важливою умовою підтримання безпеки мережі в динамічних умовах.

Для захисту від постановки радіозавад слід застосовувати Використання технологій, які підтримують декілька частот або каналів для передачі даних, щоб зменшити вплив інтерференції.

Збільшення кількості сенсорів у мережі додатково створює проблеми з отриманням, зберіганням і передачею даних, оскільки традиційні методи можуть не справлятися із значними об'ємами даних, що постійно генеруються. Використання закодованої передачі сигналів - шифрування, звуження або навпаки розширення спектру сигналів, що передаються - найбільш ефективний спосіб захисту бездротової сенсорної мережі. Застосування технологій стиснення даних та розробка алгоритмів для вибіркової передачі інформації може частково допомогти зменшити навантаження на мережу та оптимізувати її продуктивність. Однак в цьому випадку заходи щодо протидії атакам на бездротові сенсорні мережі, вимагають більш жорстких кроків щодо удосконалення зазначеного підходу [14].

Висновки. Технологія бездротових сенсорних мереж на сьогодні є надзвичайно гнучкою і практичною. Вона використовує інформаційні систем, що надають доступ до інформації в будь-який час незалежно від місця знаходження користувача.

Відсутність провідних комунікацій і мінімальні розміри сенсорних пристроїв дають змогу розгорнути мережу в складних умовах. Невизначна структура мережі, зумовлює необхідність передавання маршрутної інформації. Легкість доступу до каналів зв'язку як вправило може викликати ряд специфічних загроз для БСМ. Для забезпечення надійного функціонування БСМ необхідно застосовувати заходи по захисту даних на всіх рівнях.

Значна кількість атак здійснюється на мережевому рівні, тому при розробці засобів захисту БСМ необхідно враховувати цю особливість. Крім цього, засоби забезпечення безпеки у БСМ мають бути енергоефективним. Під цією вимогою розуміється те, що вузол не повинен виконувати складних обчислень, а також необхідно скоротити часові і енергетичні витрати на обмін повідомленнями.

Робоче середовище БСМ з точки зору надійності має певні недоліки. Складні умови середовища з вузькосмуговим багаточастотним шумом перешкоджають надійному зв'язку через обмежений ресурси каналів.

Використання у методах шифрування нових підходів разом з покращенням наявних алгоритмів безпеки на мережевому рівні дасть змогу уникнути підміни даних та забезпечити їх захищеність від несанкціонованого доступу. Тому в більшості випадків це забезпечить надійне спілкування в режимі реального часу.

Щодо подальших рекомендацій для інноваційного розвитку вітчизняних бездротових сенсорних мереж в секторі безпеки та оборони України слід відмітити можливість досліджень по впровадженню та експлуатації бездротових сенсорних мереж для забезпечення їхньої сумісності з іншими сенсорними системами, та гнучкими автоматизованими системами управління у військовій сфері.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Указ Президента України «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 20 серпня 2021 року "Про Стратегічний оборонний бюлетень України"» від 17 вересня 2021 року № 473/2021 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/473/2021#Text> (дата звернення: 23.06.2023).
2. Опенько П.В., Довженко Н. М. Оріховський П. В., Ікаєв Д. Р. Забезпечення надійності та безпеки у сучасних безпроводових сенсорних мережах на основі впровадження метрики RSS, «Повітряна міць України», Науково практичний журнал, Національний університет оборони, № 1 (6). 2024 С.131-135. Дата звернення: 12 липня 2024. [Онлайн]. Доступно <http://sap.nuou.org.ua/issue/view/18099/10998>.
3. Прищепя Т.О., Лисенко О.І. Безпроводові сенсорні мережі із мобільними сенсорами. Перспективи телекомунікацій: зб. матер. Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 21–25 квітня 2015 року. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. URL: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/104177> (дата звернення: 23.06.2023).
4. Жук О. В., Романюк В. А., Сова О. Я. Методологічні основи управління перспективними неоднорідними безпроводовими сенсорними мережами тактичної ланки управління військами. Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мережа спеціального призначення // К.: ВІПІ НТУУ «КПІ» 2016. С. 34 – 44.
5. Tewari N., Bhardwaj A. Flow Statistics Based Detection of Low Rate and High Rate DDoS Attacks // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2013. Vol. 4, № 5. P. 348 – 353.
6. Xiao P., He J., Chen Y., Fu Y. A new trusted roaming protocol in wireless mesh networks // International Journal of Sensor Networks. 2013. Vol. 14, Issue 2. P. 109 – 119. doi: 10.1504/IJSNET.2013.056610 89
7. Міночкін А.І., Романюк В.А., Жук О.В. Перспективи розвитку тактичних сенсорних мереж. // Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ «КПІ» – 2007. – № 4. С. 16 – 22.
8. Лепіх Я.І., Гордієнко Ю.О, Дзядевич С.В., Дружинін А.О., Євтух А.А., Ленков С.В., Мельник В.Г., Романов В.О. Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем: монографія. Одеса: «Астропринт», 2010. 296 с.
9. Лепіх Я.І., Гордієнко Ю.О, Дзядевич С.В., Дружинін А.О., Євтух А.А., Ленков С.В., Мельник В.Г., Проценко В.О., Романов В.О. Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління: монографія. Одеса: «Астропринт», 2011. 352 с.
10. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 20 травня 2016 року "Про Стратегічний оборонний бюлетень України": Указ Президента України від 06.06.2016 № 240/2016. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/2402016-20137> (дата звернення: 23.06.2023).
11. Лепіх Я.І., Гордієнко Ю.О, Дзядевич С.В., Дружинін А.О., Євтух А.А., Ленков С.В., Мельник В.Г., Проценко В.О., Романов В.О. Мікроелектронні датчики нового покоління для інтелектуальних систем. монографія. Одеса: «Астропринт», 2011. 92 с.
12. Ленков С.В., Лепіх Я.І., Мокрицький В.А., Селюков О.В., Сминтина В.А В.О. за заг. ред. Мокрицького В.А., Ленкова С.В. Напівпровідникові оптичні та акустоелектронні сенсори і системи. монографія. Одеса: «Астропринт», 2009. 256 с.
13. Жуковський П.С. Аналіз уразливостей бездротових сенсорних мереж, Державний університет телекомунікацій «Сучасний захист інформації» № 4(48), 2021 р. С 59-63.
14. Собчук А.В., Коваль М.О., Кравченко Ю.В., Барабаш О.В. Математична модель функціонально стійкої безпроводної сенсорної мережі. Наукове періодичне видання «Системи управління, навігації та зв'язку». Полтава, ПНТУ, 2017. Вип. 6 (46). С. 122 – 126.

REFERENCES:

1. Ukaz Prezydenta Ukrainy (2021) «Pro rishennia Rady natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy "Pro Stratehichnyi oboronnyi biuletten Ukrainy"» № 473/2021 Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/473/2021#Text> . (accessed 23 January 2023). (in Ukrainian)
2. Openko P.V., Dovzhenko N. M. Orikhovskiy P. V., Ikaiev D. R.(2024) Zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky u suchasnykh bezprovodovykh sensorykh merezhakh na osnovi vprovadzhennia metryky RSS. [Ensuring reliability and security in modern wireless sensor networks based on the implementation of the RSS metric.]. *Povitriana mits Ukrainy», Naukovo praktychnyi zhurnal, Natsionalnyi universytet oborony*, -1

(6).131-135. Retrieved from: <http://sap.nuou.org.ua/issue/view/18099/10998> (accessed 12 July 2024) (in Ukrainian)

3. Pryshchepa T.O., Lysenko O.I. (2015) Bezprovodovi sensorni merezhi iz mobilnymy sensoramy [Wireless sensor networks with mobile sensors]. *Perspektyvy telekomunikatsii: Materialy naukovotekhnichnoi konferentsii*. Kyiv: NTUU «KPI». Retrieved from: <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/104177> (accessed 23 January 2023) (in Ukrainian).

4. Zhuk O. V., Romaniuk V. A., Sova O. Y., (2016) Metodolohichni osnovy upravlinnia perspektyvnymy neodnorodnymy bezprovodovymy sensornymy merezhamy taktychnoi lanky upravlinnia viiskamy [Methodological foundations of management of prospective heterogeneous wireless sensor networks of the tactical link of military command]. *Priorytetni napriamky rozvytku telekomunikatsiinykh system ta merezha spetsialnoho pryznachennia* // K.: VITI NTUU «KPI» 2016. 5. 34 - 44. (in Ukrainian)

5. Tewari N., Bhardwaj A. (2013) Flow Statistics Based Detection of Low Rate and High Rate DDoS Attacks *International Journal of Scientific & Engineering Research*. Vol. 4, 5. 348-353. (in English)

6. Xiao P., He J., Chen Y., Fu Y. A (2013) A new trusted roaming protocol in wireless mesh networks *International Journal of Sensor Networks*, 14, Issue 2. P. 109 -119. (in English) <https://doi.org/10.1504/IJSNET.2013.056610> 89

7. Minochkin A.I., Romaniuk V.A., Zhuk O.V. (2007) Perspektyvy rozvytku taktychnykh sensorykh merezh [Prospects for the development of tactical sensor networks]. *Zbirnyk naukovykh prats VITI NTUU «KPI»* 2007, 4, 16-22. (in Ukrainian)

8. Lepikh Ya.I., Hordiienko Yu.O., Dziadevych S.V., Druzhynin A.O., Yevtukh A.A., Lienkov S.V., Melnyk V.H., Romanov V.O. (2010). *Stvorennia mikroelektronnykh datchykyv novoho pokolinnia dlia intelektualnykh system* [Creation of new generation microelectronic sensors for intelligent systems]. Odesa: "Astroprint". (in Ukrainian)

9. Lepikh Ya.I., Hordiienko Yu.O., Dziadevych S.V., Druzhynin A.O., Yevtukh A.A., Lienkov S.V., Melnyk V.H., Protsenko V.O., Romanov V.O. (2011). *Intelektualni vymiriuvalni systemy na osnovi mikroelektronnykh datchykyv novoho pokolinnia* [Intelligent measuring systems based on new generation microelectronic sensors]. Odesa: "Astroprint". (in Ukrainian)

10. Pro rishennia Rady natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy (2016) "Pro Stratehichniy oboronnyi biuletyn Ukrainy": Ukaz Prezydenta Ukrainy vid 06.06.2016 №240/2016. Available at: <https://www.president.gov.ua/documents>. (accessed 23 January 2023). (in Ukrainian)

11. Lepikh Ya.I., Hordiienko Yu.O., Dziadevych S.V., Druzhynin A.O., Yevtukh A.A., Lienkov S.V., Melnyk V.H., Protsenko V.O., Romanov V.O. (2011). *Mikroelektronni datchyky novoho pokolinnia dlia intelektualnykh system*. [New generation microelectronic sensors for intelligent systems.] Odesa: "Astroprint". (in Ukrainian)

12. Lenkov S.V., Lepikh Ya.I., Mokrytskyi V.A., Sieliukov O.V., Smyntyna V.A V.O. za zah. red. Mokrytskoho V.A., Lienkova S.V. (2009). *Napivprovodnykovi optychni ta akustoelektronni sensory i systemy*. [Semiconductor optical and acoustoelectronic sensors and systems]. Odesa: "Astroprint". (in Ukrainian)

13. Zhukovskiy P.S.(2021) *Analiz urazlyvostei bezdrotovykh sensorykh merezh* [Vulnerability analysis of wireless sensor networks] Derzhavnyi universytet telekomunikatsiï «Suchasnyi zakhyst informatsii» 4(48), 59-63. (in Ukrainian)

14. Sobchuk A.V., Koval M.O., Kravchenko Yu.V., Barabash O.V. (2017) Matematychna model funktsionalno stiiikoi bezprovodnoi sensornoi merezhi [Mathematical model of a functionally stable wireless sensor network] *Naukove periodychne vydannia «Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku»*. Poltava, PNTU, 6 (46) 122-126. (in Ukrainian)

**Ph.D. Okhramovych M.M., Ph.D., Gakhovych S.V., Ph.D. Koval M.O
Ph.D. Kravchenko O.I.**

ANALYSIS AND ASSESSMENT OF SENSOR NETWORK FUNCTIONING FEATURES UNDER JAMMING CONDITIONS AND CYBER INFLUENCE

This article analyzes modern sensor networks and examines the basic principles of their construction and application in military systems. Special attention is given to wireless sensor networks (WSNs) as a promising technology for implementing crucial aspects of military policy. This advancement has been made

possible due to the miniaturization of components and increased computational power. Sensor networks consist of a large number of low-power, multifunctional devices deployed in a specific geographical area. Although most elements of such a network have limited physical resources, when combined, they can quickly configure to perform a wide range of functional tasks such as protecting critical infrastructure and monitoring the environment.

However, with their development and transformation, issues of information security are increasingly being researched, as risks of unauthorized access or interference can seriously undermine the effectiveness and reliability of these technologies. It should be noted that due to the open nature of information transmission, there is a need to update encryption and authentication methods.

An overview of the features of sensor network functioning under jamming conditions and cyber influence is proposed, highlighting their application as highly efficient and promising solutions in information collection systems. The ability to deploy networks in challenging conditions, the absence of wired communications, and the minimal size of sensor devices make sensor network technology extremely flexible and practical. It allows for the maximum utilization of information systems, providing access to information at any time, regardless of the user's location.

Keywords: wireless sensor network, network coordinator, sensors, routers, information systems.

**Ph.D. Okhramovych M.M., Ph.D., Gakhovych S.V.,
Ph.D. Koval M.O, Ph.D. Kravchenko O.I.**

ANALYSIS AND ASSESSMENT OF SENSOR NETWORK FUNCTIONING FEATURES UNDER JAMMING CONDITIONS AND CYBER INFLUENCE

This article analyzes modern sensor networks and examines the basic principles of their construction and application in military systems. Special attention is given to wireless sensor networks (WSNs) as a promising technology for implementing crucial aspects of military policy. This advancement has been made possible due to the miniaturization of components and increased computational power. Sensor networks consist of a large number of low-power, multifunctional devices deployed in a specific geographical area. Although most elements of such a network have limited physical resources, when combined, they can quickly configure to perform a wide range of functional tasks such as protecting critical infrastructure and monitoring the environment.

However, with their development and transformation, issues of information security are increasingly being researched, as risks of unauthorized access or interference can seriously undermine the effectiveness and reliability of these technologies. It should be noted that due to the open nature of information transmission, there is a need to update encryption and authentication methods.

An overview of the features of sensor network functioning under jamming conditions and cyber influence is proposed, highlighting their application as highly efficient and promising solutions in information collection systems. The ability to deploy networks in challenging conditions, the absence of wired communications, and the minimal size of sensor devices make sensor network technology extremely flexible and practical. It allows for the maximum utilization of information systems, providing access to information at any time, regardless of the user's location.

Keywords: wireless sensor network, network coordinator, sensors, routers, information systems.

ПІДХОДИ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ ПОХИБОК ПРИ ОБЧИСЛЕННІ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ БОЙОВИХ ДІЙ В КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Наукова стаття присвячена дослідженню та аналізу сучасних методів зменшення похибок у чисельних обчисленнях, що є критично важливими для підвищення точності та надійності імітаційних моделей бойових дій. Досліджено кілька підходів, які можуть бути застосовані для досягнення цієї мети.

Перший з розглянутих методів — це метод Рунге-Кутти четвертого порядку, який є одним з найпоширеніших методів для чисельного розв'язання диференціальних рівнянь. Цей метод дозволяє отримати високу точність розв'язків при відносно невеликій кількості обчислень, що робить його ефективним для використання в реальному часі в комп'ютерних системах імітаційного моделювання.

Другий підхід, що розглядається в статті, — це використання алгоритму Кахана для точного сумування. Алгоритм Кахана дозволяє значно зменшити похибки, що виникають при сумуванні великої кількості чисел з плаваючою комою, що є особливо актуальним у випадках, коли необхідно обробляти великі обсяги даних з високою точністю.

Крім того, у статті обговорюється застосування високоточної арифметики, яка дозволяє виконувати обчислення з більшою кількістю значущих цифр, ніж це можливо при використанні стандартних типів даних з плаваючою комою. Це досягається за рахунок подання чисел у вигляді масивів, що дозволяє зберігати та обробляти додаткові біти точності.

Усі зазначені підходи реалізовані на мові програмування Python, що забезпечує їх доступність та легкість інтеграції в існуючі системи імітаційного моделювання. Python, завдяки своїй простоті та широкому набору бібліотек для наукових обчислень, є ідеальним вибором для реалізації таких алгоритмів.

Таким чином, стаття надає комплексний огляд методів зменшення похибок у чисельних обчисленнях, що можуть бути застосовані для підвищення точності математичних моделей бойових дій. Запропоновані підходи можуть бути корисними для розробників імітаційних систем, які прагнуть підвищити точність та надійність своїх моделей, а також для дослідників, які займаються чисельними методами та їх застосуванням у різних галузях.

Ключові слова: системи імітаційного моделювання, точність обчислень двійкових чисел з плаваючою комою, підвищення точності систем імітаційного моделювання, системи імітаційного моделювання бойових дій.

Вступ. Імітаційне моделювання бойових дій є важливим інструментом у військовій науці та практиці, що дозволяє аналізувати складні сценарії та приймати обґрунтовані рішення. З розвитком комп'ютерних технологій, можливості моделювання значно розширилися, що дозволяє створювати більш реалістичні та детальні моделі [1]. Однак, точність цих моделей значною мірою залежить від математичних розрахунків, які можуть бути піддані різним видам похибок [2]. Зменшення цих похибок є критично важливим для підвищення надійності та достовірності результатів моделювання, що, в свою чергу, впливає на ефективність військових операцій та прийняття рішень [3].

Проблема зменшення похибок у математичних моделях бойових дій є актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору. Науково ця проблема пов'язана з розвитком методів чисельного аналізу та оптимізації, які дозволяють підвищити точність розрахунків.

Практично, зменшення похибок у моделях сприяє більш точному прогнозуванню результатів бойових дій, що є критично важливим для прийняття рішень у реальних умовах.

Завданням даного дослідження є розробка підходів, які дозволять зменшити похибки при обчисленні математичних моделей бойових дій. Це включає в себе аналіз існуючих

методів, їх реалізації на мовах програмування високого рівня, розробка підходу що дозволить зменшити значення похибки під час машинного обрахунку двійкових чисел із плаваючою комою. Успішне вирішення цієї задачі сприятиме підвищенню ефективності імітаційного моделювання та, як наслідок, покращенню якості військового планування та управління.

Аналіз останніх досліджень. У статті [4] авторами розглядається використання штучного інтелекту для покращення військових навчальних симуляцій в НАТО. Штучний інтелект дозволяє створювати більш реалістичні та адаптивні сценарії, що допомагає солдатам швидше навчатися, гнучкіше мислити та краще адаптуватися до нових ситуацій. Також штучний інтелект дозволяє швидко моделювати нові загрози, що робить навчання більш актуальним та ефективним.

В основі покращення військових навчальних симуляцій за допомогою штучного інтелекту, описаних у статті, базуються на принципах: реалістичності, адаптивності, персоналізації, ефективності та актуальності.

У роботі [5] авторами розглядаються сучасні виклики та можливості в області моделювання бойових дій. Проаналізовано, як зміни у військовій справі, технологіях та геополітичній обстановці впливають на актуальність та ефективність існуючих методів моделювання та розкриваються аспекти щодо впливу нових технологій, зміни характеру сучасних конфліктів, потреба в більшій реалістичності моделей, впровадження інноваційних підходів до моделювання.

Метою статті є надання рекомендацій щодо розвитку та вдосконалення бойових симуляцій для більш ефективного планування, аналізу та прийняття рішень в умовах сучасного світу.

У дослідженні [6] автори розглядають застосування методів машинного навчання для вирішення задач стохастичного управління та теорії ігор. Робота зосереджується на методах глибокого навчання, які відкрили можливість розв'язувати проблеми, навіть у великих розмірах або коли структура дуже складна, що перевищує те, що можна досягти традиційними чисельними методами. Розглядається переважно безперервний час і безперервний простір. Багато нових підходів базуються на методах на основі нейронної мережі для розв'язування диференціальних рівнянь із частковими похідними великої розмірності чи зворотних стохастичних диференціальних рівнянь, або на безмодельному навчанні з підкріпленням для Марківських процесів прийняття рішень. Ця стаття містить вступ до методів машинного навчання і підсумовує сучасні роботи на перехресті машинного навчання та стохастичного керування та ігор.

Стаття [7] представляє систему на основі машинного навчання для прогнозування результатів морських битв. Автори використовують метод випадкового лісу для аналізу різних факторів, що впливають на результат бою, таких як характеристики кораблів (броня, вогнева міць, швидкість), їх розташування та стратегія.

Система моделює бій та враховує різні сценарії, щоб передбачити ймовірність перемоги кожної сторони. Дослідження демонструє потенціал використання машинного навчання для військового моделювання та планування, дозволяючи оцінити ефективність різних стратегій та тактик. Результати показують, що точність симуляцій досягається за рахунок використання ансамблевого методу, врахування технічних характеристик (особливостей) об'єктів, моделювання великої кількості різноманітних сценаріїв та проведення оптимізації моделі під необхідні параметри моделювання.

У роботі [8] досліджується зростаюча роль штучного інтелекту (ШІ) у сфері моделювання та симуляції. Автори розглядають, як методи ШІ, такі як машинне навчання, глибоке навчання та еволюційні алгоритми, можуть бути використані для покращення різних аспектів моделювання та симуляції.

У статті розглядається використання ШІ для створення моделей, калібрування та валідації моделей, оптимізації експериментів, аналізу результатів симуляції та управління складними системами.

Автори також описують виклики та можливості, пов'язані з використанням ІІІ в моделюванні та симуляції, та пропонують напрямки для майбутніх досліджень. Стаття підкреслює, що інтеграція ІІІ та моделювання та симуляції має значний потенціал для вирішення складних проблем у різних галузях.

Із наведеного аналізу останніх досліджень ми бачимо, що основна наукова діяльність спрямована на досягнення базової точності систем імітаційного моделювання за рахунок використання емпіричних даних, розробки адаптивних моделей та впровадження технологічних інновацій, хоча математичні обчислення і чисельні методи відіграють критично важливу роль у забезпеченні точності та надійності моделей [9, 10].

Метою роботи є розробка методу підвищення точності математичних розрахунків в комп'ютерних системах імітаційного моделювання бойових дій.

Виклад основного матеріалу дослідження

Як правило, математичні моделі, що використовуються у комп'ютерних системах імітаційного моделювання бойових дій описуються диференційними рівняннями [11]. Величина похибки обчислень рівнянь напряму залежить від точності методу який використовується.

Для комп'ютеризованих систем імітаційного моделювання бойових дій, де потрібна висока точність, найкраще підходить Метод Рунге-Кутта Четвертого Порядку [12].

Переваги методу Рунге-Кутта Четвертого Порядку:

1. Висока точність. Це особливо важливо для моделювання складних систем, де навіть невеликі похибки можуть призвести до значних відхилень у результатах.

2. Стабільність. Є стабільним для багатьох типів задач, особливо коли крок інтегрування обрано правильно.

3. Універсальність. Підходить для широкого спектра задач, включаючи нелінійні та нестационарні системи, які часто зустрічаються в моделюванні бойових дій.

4. Простота Реалізації. Незважаючи на високу точність, метод є зручним для інтеграції в комп'ютеризовані системи.

5. Ефективність. Забезпечує хороший баланс між точністю та обчислювальними витратами, що важливо для реального часу або великих симуляцій.

Розглянемо розв'язок звичайного диференційного рівняння методом Рунге-Кутта [13] Четвертого Порядку та Аналітичним методом на прикладі:

$$\frac{dy}{dx} = -2y \quad (1)$$

Метод Рунге-Кутта четвертого порядку обчислює наступне значення у за формулами:

1. Обчислення проміжних значень:

$$\begin{aligned} k_1 &= f(t_n, y_n) \\ k_2 &= f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1\right), \\ k_3 &= f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2\right), \\ k_4 &= f(t_n + h, y_n + hk_3), \end{aligned} \quad (2)$$

2. Оновлення значення у:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3)$$

Дослід: Порівняння методу Рунге-Кутта четвертого порядку з Аналітичним Розв'язком.

Розв'яжемо диференціальне рівняння $\frac{dy}{dx} = -2y$ з початковою умовою $y(0) = 1$ аналітичним методом.

Це рівняння є лінійним і може бути розв'язане методом розділення змінних:

1. Розділимо змінні:

$$\frac{dy}{y} = -2dx;$$

2. Інтегруємо обидві частини:

$$\int \frac{dy}{y} = \int -2dx$$
$$\ln|y| = -2x + C$$

3. Знайдемо y :

Піднесемо обидві частини до степеня e для усунення логарифма:

$$y = e^{-2x+C} = e^C \cdot e^{-2x}$$

Позначемо e^C як нову константу C_1 :

$$y = C_1 e^{-2x}$$

4. Використовуємо початкову умову $y(0) = 1$:

$$1 = C_1 e^{-2 \cdot 0} \Rightarrow C_1 = 1$$

Отже, аналітичний розв'язок рівняння:

$$y(x) = e^{-2x}$$

Цей розв'язок описує експоненційне зменшення функції y з ростом x , і він є точним для будь-якого значення x .

Щоб обчислити чисельний розв'язок диференціального рівняння $\frac{dy}{dx} = -2y$ з початковою умовою $y(0) = 1$ методом Рунге-Кутта четвертого порядку на інтервалі $x = 0$ до $x = 1$ з кроком $h = 0.1$, виконаємо наступні обчислення:

Для кожного кроку n , обчислюємо:

1. $k_1 = h \cdot f(x_n, y_n) = h \cdot (-2y_n)$
2. $k_2 = h \cdot f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right) = h \cdot (-2(y_n + \frac{k_1}{2}))$
3. $k_3 = h \cdot f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right) = h \cdot (-2(y_n + \frac{k_2}{2}))$
4. $k_4 = h \cdot f(x_n + h, y_n + k_3) = h \cdot (-2(y_n + k_3))$

Оновлюємо значення y :

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

Обчислення для кожного кроку

Крок 1: $x_0 = 0, y_0 = 1$

$k_1 = 0.1 \cdot (-2 \cdot 1) = -0.2$

$$k_2 = 0.1 \cdot (-2 \cdot (1 - 0.1)) = -0.18$$

$$k_3 = 0.1 \cdot (-2 \cdot (1 - 0.9)) = -0.182$$

$$k_4 = 0.1 \cdot (-2 \cdot (1 - 0.182)) = -0.1636$$

$$y_2 = 1 + \frac{1}{6}(-0.2 + 2(-0.18) + 2(-0.182) + (-0.1636)) \approx 0.8187$$

Крок 2: $x_1 = 0.1, y_1 \approx 0.8187$

$$k_1 = 0.1 \cdot (-2 \cdot 0.8187) = -1.16374$$

$$k_2 = 0.1 \cdot (-2 \cdot (0.8187 - 0.08187)) = -0.147366$$

$$k_3 = 0.1 \cdot (-2 \cdot (0.8187 - 0.073683)) = -0.148003$$

$$k_4 = 0.1 \cdot (-2 \cdot (0.8187 - 0.148003)) = -0.135139$$

$$y_2 = 0.8187 + \frac{1}{6}(-1.16374 + 2(-0.147366) + 2(-0.148003) + (-0.135139)) \approx 0.6703$$

Цей процес повторюється для кожного наступного кроку до $x = 1$. Кінцевий результат буде наближенням до аналітичного розв'язку $y(x) = e^{-2x}$ на кожному кроці. Чисельні значення можуть мати незначне відхилення у зв'язку з округленням, але у загальному вигляді будуть близькими до аналітичного розв'язку.

Ось реалізація методу Рунге-Кутта четвертого порядку для розв'язання диференційного рівняння $\frac{dy}{dx} = -2y$ з початковою умовою $y(0) = 1$ на мові програмування Python:

```
def runge_kutta_4th_order(f, y0, x0, x_end, h):
    """
    f: функція, що описує диференціальне рівняння dy/dx = f(x, y)
    y0: початкове значення y
    x0: початкове значення x
    x_end: кінцеве значення x
    h: крок інтегрування
    """
    # Ініціалізація
    x = x0
    y = y0
    results = [(x, y)]
    # Ітерація по кроках
    while x < x_end:
        k1 = h * f(x, y)
        k2 = h * f(x + h / 2, y + k1 / 2)
        k3 = h * f(x + h / 2, y + k2 / 2)
        k4 = h * f(x + h, y + k3)
        # Оновлення значення y
        y += (k1 + 2 * k2 + 2 * k3 + k4) / 6
        # Оновлення значення x
        x += h
        # Збереження результату
        results.append((x, y))
    return results
# Визначення функції для диференційного рівняння
def dydx(x, y):
    return -2 * y
```

```
# Початкові умови
y0 = 1
x0 = 0
x_end = 1
h = 0.1
# Виконання методу Рунге-Кутта
solution = runge_kutta_4th_order(dydx, y0, x0, x_end, h)
# Виведення результатів
for x, y in solution:
    print(f"x = {x:.1f}, y = {y:.4f}")
```

Пояснення:

Функція `runge_kutta_4th_order`: Реалізує метод Рунге-Кутта четвертого порядку. Вона приймає функцію `f`, яка описує диференціальне рівняння, початкові умови `y0` і `x0`, кінцеве значення `x_end`, і крок інтегрування `h`.

Функція `dydx`: Визначає праву частину диференціального рівняння $\frac{dy}{dx} = -2y$

Результати: Зберігаються у списку `results` і виводяться на екран.

Цей код обчислює значення `y` на кожному кроці `x` від 0 до 1 з кроком 0.1, використовуючи метод Рунге-Кутта четвертого порядку.

Наступний метод який дозволяє підвищити точність обрахунків це компенсоване сумування (Алгоритм Кахана) [12], який призначений для зменшення похибок округлення при додаванні великої кількості чисел з плаваючою комою. Він працює шляхом збереження невеликої компенсації, яка коригує суму на кожному кроці. Це особливо корисно, коли додаються числа з дуже різними порядками величин.

Принцип роботи алгоритму Кахана

1. Ініціалізація: Початкова сума (`total`) встановлюється на 0, а компенсація (`compensation`) також встановлюється на 0.

2. Ітерація по числах: для кожного числа в списку:

Обчислюється кориговане значення (`y`) шляхом віднімання компенсації від поточного числа.

Додається кориговане значення до поточної суми, отримуючи тимчасову суму (`t`).

Компенсація оновлюється, щоб врахувати похибку, яка виникла при додаванні.

Оновлюється загальна сума.

3. Результат: Після проходження всіх чисел, `total` містить суму з мінімальною похибкою округлення.

Алгоритм Кахана є ефективним методом для зменшення похибок округлення при додаванні чисел з плаваючою комою, особливо коли числа мають різні порядки величин. Це робить його корисним у чисельних обчисленнях, де точність є критично важливою.

Порівняємо результати звичайного додавання і алгоритму Кахана для прикладу з числами з плаваючою комою:

Числа

`a = 1.00000001`

`b = 1 x 10-7`

`c = -1.00000001`

Звичайне додавання

1. Додавання `a` і `b`:

`1.00000001 + 1 x 10-7 = 1.00000002`

Через обмежену точність, результат буде округлений до `1.00000001`, втрачаючи `b`.

2. Додавання `c`:

$$1.00000001 - 1.00000001 = 0.0$$

Результат звичайного додавання: 0.0

Компенсоване сумування (Алгоритм Кахана)

1. Ініціалізація:

$$\text{total} = 0.0$$

$$\text{compensation} = 0.0$$

2. Додавання a:

$$y = a - \text{compensation} = 1.00000001 - 0.0 = 1.00000001$$

$$t = \text{total} + y = 0.0 + 1.00000001 = 1.00000001$$

$$\text{compensation} = (t - \text{total}) - y = (1.00000001 - 0.0) - 1.00000001 = 0.0$$

$$\text{total} = 1.00000001$$

3. Додавання b:

$$y = b - \text{compensation} = 1 \times 10^{-7} - 0.0 = 1 \times 10^{-7}$$

$$t = \text{total} + y = 1.00000001 + 1 \times 10^{-7} = 1.00000002$$

$$\text{compensation} = (t - \text{total}) - y = (1.00000002 - 1.00000001) - 1 \times 10^{-7} = 0.0$$

$$\text{total} = 1.00000002$$

4. Додавання c:

$$y = c - \text{compensation} = -1.00000001 - 0.0 = -1.00000001$$

$$t = \text{total} + y = 1.00000002 - 1.00000001 = 1 \times 10^{-7}$$

$$\text{compensation} = (t - \text{total}) - y = (1 \times 10^{-7} - 1.00000002) - (-1.00000001) = 0.0$$

$$\text{total} = 1 \times 10^{-7}$$

Результат компенсованого сумування: 1×10^{-7}

Цей приклад демонструє, як алгоритм Кахана може значно покращити точність обчислень, коли додаються числа з різними порядками величин, зменшуючи похибки округлення.

Реалізація алгоритму Кахана на Python для прикладу з числами 1.00000001, -0.00000001, 1×10^{-7} :

```
def kahan_sum(numbers):
    total = 0.0
    compensation = 0.0
    for number in numbers:
        # Коригування числа з урахуванням компенсації
        y = number - compensation
        # Тимчасова сума
        t = total + y
        # Оновлення компенсації
        compensation = (t - total) - y
        # Оновлення загальної суми
        total = t
    return total

# Список чисел
numbers = [1.00000001, 1e-7, -1.00000001]
# Виконання компенсованого сумування
result = kahan_sum(numbers)
# Виведення результату
print(f'Компенсоване сумування (Кахан): {result}')
```

Пояснення:

Ініціалізація:

Total – початкова сума, встановлена на 0.0.

Compensation – початкова компенсація, встановлена на 0.0.

Цикл обчислення:

Для кожного числа в списку:

Коригування числа: обчислюється у як різниця між поточним числом і компенсацією.

Тимчасова сума: обчислюється t як сума total і у.

Оновлення компенсації: обчислюється нова компенсація для коригування похибок округлення.

Оновлення загальної суми: total оновлюється до значення t.

Результат:

Після виконання алгоритму Кахана, результатом є більш точна сума 1×10^{-7} , яка враховує всі додані числа, включаючи дуже мале b.

Цей код демонструє, як алгоритм Кахана може значно покращити точність обчислень, коли додаються числа з різними порядками величин.

Наступний метод це використання високоточної арифметики, що може бути критично важливою для забезпечення точності моделювання складних сценаріїв, таких як траєкторії снарядів, витрати ресурсів, або логістичні розрахунки. Використання високоточної арифметики дозволяє зменшити похибки, які можуть вплинути на результати моделювання.

Приклад: Імітація розрахунку траєкторії снаряда

У цьому прикладі ми використовуємо модуль decimal для моделювання траєкторії снаряда з високою точністю, що може бути важливим для симуляцій, де навіть невеликі похибки можуть суттєво вплинути на результат.

```
from decimal import Decimal, getcontext
import math
# Встановлення точності для всіх обчислень
getcontext().prec = 20
# Функція для обчислення траєкторії снаряда
def calculate_trajectory(initial_velocity, angle_degrees, time):
    # Перетворення кута в радіани
    angle_radians = Decimal(math.radians(angle_degrees))
    # Обчислення компонент швидкості
    velocity_x = initial_velocity * Decimal(math.cos(angle_radians))
    velocity_y = initial_velocity * Decimal(math.sin(angle_radians))
    # Гравітаційне прискорення
    g = Decimal('9.81') # м/с²
    # Обчислення положення снаряда в момент часу
    x = velocity_x * time
    y = velocity_y * time - (g * time**2) / 2
    return x, y
# Ініціалізація параметрів
initial_velocity = Decimal('500.0') # м/с
angle_degrees = Decimal('45.0') # градуси
time = Decimal('10.0') # секунди
# Обчислення траєкторії
position_x, position_y = calculate_trajectory(initial_velocity, angle_degrees, time)
# Виведення результату
print(f"Положення снаряда через {time} секунд: x = {position_x}, y = {position_y}")
```

Пояснення

Модуль decimal: використовується для забезпечення високоточної арифметики, що дозволяє уникати похибок округлення, які можуть вплинути на точність моделювання.

Обчислення траєкторії: функція calculate_trajectory обчислює положення снаряда в просторі через заданий час, використовуючи початкову швидкість і кут запуску.

Гравітація: враховується вплив гравітації на траєкторію снаряда.

Застосування

Бойові симуляції: для моделювання траєкторій снарядів, ракет та інших об'єктів з високою точністю.

Логістичні розрахунки: для моделювання витрат ресурсів і часу в бойових умовах.

Аналіз сценаріїв: для оцінки ефективності різних стратегій і тактик.

Цей приклад демонструє, як високоточна арифметика може бути використана в системах імітаційного моделювання бойових дій для забезпечення точності і надійності обчислень.

У системах імітаційного моделювання бойових дій, де можуть бути необхідні обчислення з дуже великими числами [16], наприклад, для моделювання великих масштабів або тривалих періодів часу, використання строкового подання або подання у вигляді масивів може бути корисним. Це дозволяє зберігати і обробляти великі числа, які виходять за межі стандартних типів даних.

Приклад: Додавання великих чисел для моделювання ресурсів

```
def add_large_numbers(num1, num2):
    # Перетворення рядків у масиви цифр
    num1 = [int(digit) for digit in num1]
    num2 = [int(digit) for digit in num2]
    # Вирівнювання довжини масивів
    max_len = max(len(num1), len(num2))
    num1 = [0] * (max_len - len(num1)) + num1
    num2 = [0] * (max_len - len(num2)) + num2
    carry = 0
    result = []
    # Додавання цифр з кінця
    for i in range(max_len - 1, -1, -1):
        total = num1[i] + num2[i] + carry
        carry = total // 10
        result.append(total % 10)
    # Додавання залишкового переносу
    if carry:
        result.append(carry)
    # Перетворення результату в рядок
    result.reverse()
    return ''.join(map(str, result))

# Приклад використання для моделювання ресурсів
# Наприклад, загальна кількість боєприпасів або пального
resources1 = "123456789012345678901234567890"
resources2 = "987654321098765432109876543210"
total_resources = add_large_numbers(resources1, resources2)
print(f"Загальна кількість ресурсів: {total_resources}")
```

Пояснення

Перетворення в масиви: кожна цифра великого числа зберігається в окремому елементі масиву, що дозволяє виконувати арифметичні операції з великими числами.

Вирівнювання довжини: масиви вирівнюються по довжині, додаючи нулі на початок, щоб забезпечити коректне додавання.

Арифметичні операції: реалізоване додавання з урахуванням переносу, що дозволяє точно обчислювати суму великих чисел.

Застосування в моделюванні бойових дій: цей підхід дозволяє ефективно працювати з дуже великими числами в системах імітаційного моделювання бойових дій, забезпечуючи необхідну точність і діапазон для складних обчислень.

Як результат для досягати високої точності в комп'ютеризованих системах імітаційного моделювання бойових дій об'єднуємо методи Рунге-Кутта четвертого порядку, компенсованого сумування (алгоритм Кахана), високоточної арифметики, та подання чисел у вигляді масивів.

Розглянемо програмну реалізацію з комбінованим підходом щодо збільшення точності математичних операцій з двійковими числами з плаваючою комою на прикладі звичайного диференційного рівняння:

$$\frac{dy}{dx} = -2y$$

Реалізуємо чисельне розв'язання диференційного рівняння $\frac{dy}{dx} = -2y$ за допомогою методу Рунге-Кутта четвертого порядку, компенсованого сумування (алгоритм Кахана), високоточної арифметики та подання чисел у вигляді масивів, наступним чином.

```

Реалізація в Python
from decimal import Decimal, getcontext
# Встановлення високої точності для обчислень
getcontext().prec = 50
# Функція для алгоритму Кахана, що зменшує похибки округлення
def kahan_sum(input_list):
    total = Decimal('0.0')
    c = Decimal('0.0') # Компенсація
    for number in input_list:
        y = Decimal(number) - c
        t = total + y
        c = (t - total) - y
        total = t
    return total
# Метод Рунге-Кутта четвертого порядку для чисельного розв'язання диференціальних
рівнянь
def runge_kutta_4th_order(f, y0, x0, x_end, h):
    n = int((x_end - x0) / h)
    y = Decimal(y0)
    x = Decimal(x0)
    results = []
    for _ in range(n):
        k1 = h * f(x, y)
        k2 = h * f(x + h / 2, y + k1 / 2)
        k3 = h * f(x + h / 2, y + k2 / 2)
        k4 = h * f(x + h, y + k3)
        # Використання алгоритму Кахана для точного сумування
        delta_y = kahan_sum([k1, 2 * k2, 2 * k3, k4]) / 6
        y += delta_y
        x += h
        results.append((x, y))

    return results
# Диференціальне рівняння: dy/dx = -2y
def differential_eq(x, y):
    return -2 * y

```

```
# Початкові умови для розв'язання
y0 = '1.0' # Початкове значення y
x0 = '0.0' # Початкове значення x
x_end = '5.0' # Кінцеве значення x
h = '0.1' # Крок інтегрування
# Розв'язання диференційного рівняння
solution = runge_kutta_4th_order(differential_eq, y0, x0, x_end, h)
# Виведення результатів
for x, y in solution:
    print(f"x = {x}, y = {y}")
```

Висновки. Комбінований підхід дозволяє ефективно розв'язувати диференційні рівняння з високою точністю, що є важливим для моделювання складних процесів у системах імітаційного моделювання бойових дій. Метод Рунге-Кутта четвертого порядку забезпечує точність чисельного інтегрування, алгоритм Кахана зменшує похибки округлення, а високоточна арифметика та подання чисел у вигляді масивів дозволяють працювати з великими числами.

Отримані результати дозволять у подальшому проводити дослідження щодо стійкості чисельних методів до похибок вхідних даних або змін параметрів моделі, а також розробити метод для оцінки надійності та верифікації чисельних моделей у бойових сценаріях.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Шинкарук, О., Михайлишин, О. Окремі аспекти застосування імітаційного моделювання у підготовці складових сектору безпеки і оборони України / Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України 2019. №80(2). С. 227-241 URL: <https://doi.org/10.32453/3.v80i2.201>
2. Oberkamp, W., DeLand, S., Rutherford, B., Diegert, K., Alvin K. Error and uncertainty in modeling and simulation / Reliability Engineering & System Safety 2002. №75(3). pp. 333-357 URL: [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(01\)00120-X](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00120-X)
3. Robinette, S. Testing simulation platforms to accelerate optimal military decision-making in a platoon-formation task / Naval postgraduate school, 2021. 103 p. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/trecms/pdf/AD1151125.pdf>
4. Ortmann, M. Artificial Intelligence in combat simulations: How AI is changing NATO soldier training / Defense magazine 2024 URL: <https://www.defensemagazine.com/article/artificial-intelligence-in-combat-simulations-how-ai-is-changing-nato-soldier-training>
5. Cox, C., Dellinger, J., Sackett, S., White, A., Gillespie, S. Modeling combat simulations in an evolving world – analysis to provide innovative recommendations for combat simulations / Proceedings of the Annual General Donald R. Keith Memorial Conference 2024 URL: https://www.ieworldconference.org/content/WP2024/Papers/GDRKMCC24_56.pdf
6. Laurière, M. Recent developments in machine learning methods for stochastic control and games / American Institute of Mathematical Sciences 2024. №14(3). pp. 435-525 URL: <https://doi.org/10.3934/naco.2024031>
7. Intizhami, N., Husodo, A., Jatmiko, W. Warfare Simulation: Predicting Battleship Winner Using Random Forest / IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (ComNetSat) 2019. pp. 30-34 URL: <https://doi.org/10.1109/COMNETSAT.2019.8844049>
8. Fachada, N., David, N. Artificial Intelligence in Modeling and Simulation / Algorithms №17(6). 2024 URL: <https://doi.org/10.3390/a17060265>
9. Шаріпова, І., Трутнєв С., Левченко А., Головка О. Витоки помилок прогнозування ситуацій в комп'ютерних системах імітаційного моделювання / Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса) 2020. № 2(14). С. 41 - 50 URL: <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2020.14.2.41-50>

10. Левченко, А., Войтенков, Р. Граничні точності обчислень в інформаційних системах з представленням чисел із плаваючою комою / Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). Одеса. 2014. № 2(2). С. 157-160 URL:http://vaodessa.org.ua/images/zbirnyk_2/22.PDF
11. Введення в моделювання динамічних систем: Навчальний посібник / Хусайнов, Д., Харченко, І., Шатирко, А. 2010. 132 с. URL:<https://www.csc.knu.ua/en/library/books/khusainov-17.pdf>
12. Zheng, L., Zhang, X. Numerical Methods / Modeling and Analysis of Modern Fluid Problems, 2017. pp. 361-455 URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811753-8.00008-6>
13. Dmitruk, B., Stpiczynski, P. Improving accuracy of summation using parallel vectorized Kahan's and Gill-Moller algorithms / Concurrency and Computation: Practice and Experience №35(23). 2023 URL: <https://doi.org/10.1002/cpe.7763>

REFERENCES:

1. Shynkaruk, O. and Mykhaulyshyn, O. (2019), "Okremi aspekty zastosuvannya imitatsiynoho modelyuvannya u pidhotovtsi skladovykh sektoru bezpeky i oborony Ukrainy" [Some aspects of simulation modeling usage in the training of the components in the security and defense sector of Ukraine], *Collection of Scientific Works of the National Academy of the State Border Service of Ukraine* No. 80(2), pp. 227-241 URL:<https://doi.org/10.32453/3.v80i2.201>
2. Oberkamp, W., DeLand, S., Rutherford, B., Diegert, K. and Alvin, K. (2002), "Error and uncertainty in modeling and simulation", *Reliability Engineering & System Safety* No. 75(3), pp. 333-357 URL:[https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(01\)00120-X](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00120-X)
3. Robinette, S. (2021) *Testing simulation platforms to accelerate optimal military decision-making in a platoon-formation task*, Naval postgraduate school, Monterey, California 103 p. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/trecms/pdf/AD1151125.pdf>
4. Ortmann, M. (2024) "Artificial Intelligence in combat simulations: How AI is changing NATO soldier training", *Defense magazine*. URL:<https://www.defensemagazine.com/article/artificial-intelligence-in-combat-simulations-how-ai-is-changing-nato-soldier-training>
5. Cox, C., Dellinger, J., Sackett, S., White, A. and Gillespie, S. (2024) "Modeling combat simulations in an evolving world – analysis to provide innovative recommendations for combat simulations", *Proceedings of the Annual General Donald R. Keith Memorial Conference*. URL: https://www.ieworldconference.org/content/WP2024/Papers/GDRKMCC24_56.pdf
6. Lauriere, M. (2024) "Recent developments in machine learning methods for stochastic control and games", *American Institute of Mathematical Sciences* No.14(3), pp. 435-525 URL:<https://doi.org/10.3934/naco.2024031>
7. Intizhami, N., Husodo, A. and Jatmiko, W. (2019) "Warfare Simulation: Predicting Battleship Winner Using Random Forest", *IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (ComNetSat)*, pp. 30-34 URL:<https://doi.org/10.1109/COMNETSAT.2019.8844049>
8. Fachada, N. and David, N. (2024) "Artificial Intelligence in Modeling and Simulation". *Algorithms* No.17(6) URL:<https://doi.org/10.3390/a17060265>
9. Sharipova, I., Trutniev, S., Levchenko, A. and Holovko, O. (2020) "Vytoky pomylkovykh prohnozuvannya sytuatsiy v kompyuternykh systemakh imitatsiynoho modelyuvannya" [Sources of situation forecasting errors in computer simulation systems], *Collection of scientific works of the Odesa Military Academy*, No.2(14), pp. 41- 50 URL: <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2020.14.2.41-50>
10. Levchenko A. and Voytenkov R. (2014) "Hranychni tochnosti obchyslen v informatsiynykh systemakh z predstavlennyam chysel iz plavayuchoyu komoyu" [Limiting accuracy of the calculations in information system with numeration with sailling comma] *Collection of scientific works of the Odesa Military Academy*, No.2(2), pp. 157-160 URL:http://vaodessa.org.ua/images/zbirnyk_2/22.PDF
11. Khusainov, D., Kharchenko, I. and Shatyrko A. (2010) "Vvedennya v modelyuvannya dynamichnykh system" [Introduction to modeling of dynamic systems], Study book, Kyiv 132 p. URL:<https://www.csc.knu.ua/en/library/books/khusainov-17.pdf>
12. Zheng, L. and Zhang, X. (2017) "Numerical Methods. Modeling and Analysis of Modern Fluid Problems", pp. 361-455 URL:<https://www.sciencedirect.com/topics/mathematics/runge-kutta-method>

13. Dmitruk, B. and Stpiczynski, P. (2023) "Improving accuracy of summation using parallel vectorized Kahans and Gill-Moller algorithms", *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, No.35(23). URL: <https://doi.org/10.1002/cpe.7763>

Trutniev S.G.

APPROACHES TO THE REDUCTION OF ERRORS IN THE CALCULATION OF MATHEMATICAL MODELS OF COMBAT ACTIONS IN COMPUTER SIMULATION SYSTEMS

The scientific article is dedicated to the study and analysis of modern methods for reducing errors in numerical calculations, which are critically important for enhancing the accuracy and reliability of simulation models of combat operations. Several approaches have been investigated that can be applied to achieve this goal.

The first method discussed is the fourth-order Runge-Kutta method, which is one of the most common methods for numerically solving differential equations. This method allows for high accuracy of solutions with a relatively small number of calculations, making it effective for real-time use in computer simulation systems.

The second approach considered in the article is the use of the Kahan algorithm for precise summation. The Kahan algorithm significantly reduces errors that occur when summing a large number of floating-point numbers, which is particularly relevant in cases where large volumes of data need to be processed with high precision.

Additionally, the article discusses the application of high-precision arithmetic, which allows calculations to be performed with more significant digits than is possible with standard floating-point data types. This is achieved by representing numbers as arrays, allowing for the storage and processing of additional bits of precision.

All the mentioned approaches are implemented in the Python programming language, ensuring their accessibility and ease of integration into existing simulation systems. Python, with its simplicity and wide range of libraries for scientific computing, is an ideal choice for implementing such algorithms.

Thus, the article provides a comprehensive overview of methods for reducing errors in numerical calculations that can be applied to improve the accuracy of mathematical models of combat operations. The proposed approaches can be useful for developers of simulation systems who aim to enhance the accuracy and reliability of their models, as well as for researchers engaged in numerical methods and their applications in various fields.

Keywords: simulation modeling systems, floating-point binary number calculation accuracy, improving the accuracy of simulation modeling systems, combat simulation modeling systems

Дані про авторів

Банзак Оксана Вікторівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри Електроніки, транспортних технологій та логістики Державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса ORCID: 0000-0002-6649-5013.

Банзак Геннадій В'ячеславович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Метрології, якості та стандартизації Державного університету інтелектуальних технологій та зв'язку, м. Одеса, ORCID: 0000-0003-1684-3785.

Гахович Сергій Вікторович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри Кафедра військово-технічної підготовки Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка, ORCID: 0000-0002-9135-6568.

Гайша Олена Олександрівна, в.о. завідувача кафедри інженерних технологій Міжнародного класичного університету імені Пилипа Орлика, м. Миколаїв, ORCID: 0009-0000-4543-912X, SCOPUS ID – 57202193987.

Гайша Олександр Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерних технологій Міжнародного класичного університету імені Пилипа Орлика, м. Миколаїв, ORCID: 0000-0003-3711-547X, SCOPUS ID – 55338466100.

Грабовський Олег Вікторович, доцент, кандидат технічних наук, декан факультету метрології, автоматизації та електроніки Державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса ORCID: 0000-0001-7134-3682.

Гунченко Юрій Олександрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, ORCID: 0000-0003-4423-8267, SCOPUS ID 57193069126.

Дансо Жанет, аспірантка, департамент інформаційних систем і технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка, ORCID: 0000-0002-8707-2298.

Дідик Валентин Олександрович, доктор філософії, доцент кафедри організації розвідувально-інформаційної роботи та технічних засобів розвідки, Військова академія, м. Одеса, ORCID: 0000-0003-4267-9122.

Дружинін Володимир Анатолійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних систем та технологій факультету інформаційних технологій, ORCID: 0009-0009-5049-0099.

Душкін Юрій Георгійович, старший викладач кафедри організації розвідувально-інформаційної роботи та технічних засобів розвідки, Військова академія м. Одеса, ORCID: 0000-0003-0449-0863.

Зайцев Дмитро Володимирович, кандидат військових наук, доцент, доцент кафедри, факультет післядипломної освіти Київського національного університету імені Тараса Шевченка, ORCID: 0000-0002-3784-5790.

Зуй Оксана Миколаївна, викладач, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса, ORCID: 0000-0001-9520-4441, SCOPUS ID 54793792200.

Іванцов Віталій Павлович, ад'юнкт Військової академії м. Одеса, ORCID: 0009-0003-5169-1366.

Коваль Мирослав Олександрович, доктор філософії старший науковий співробітник Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка, ORCID: 0000-0002-8374-7390.

Кравченко Олександр Іванович, кандидат педагогічних наук, старший науковий співробітник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка, ORCID: 0000-0002-7865-5870.

Кузавков Василь Вікторович, доктор технічних наук, професор, начальник кафедри побудови телекомунікаційних систем Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, ORCID: 0000-0002-0655-9759.

Лапа Володимир Іванович, викладач кафедри побудови телекомунікаційних систем Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, ORCID: 0000-0002-9113-7672.

Лещенко Валерій Вячеславович, старший викладач, Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, ORCID: 0000-0003-0219-5174 SCOPUS ID 57644807900.

Ленков Сергій Васильович, доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, головний науковий співробітник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка, ORCID: 0000-0001-7689-239x, Scopus ID: 58061035100, DBLP: 6.

Макаліш Олег Володимирович, старший викладач кафедри озброєння бойових машин та вогневої підготовки Військової академії, м. Одеса.

Максименко Юрій Анатолійович, кандидат технічних наук, начальник кафедри організації розвідувально-інформаційної роботи та технічних засобів розвідки, Військова академія, м. Одеса, ORCID: 0000-0002-1227-2009.

Маміч Віктор Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри організації розвідувально-інформаційної роботи та технічних засобів розвідки, Військова академія, м. Одеса, ORCID: 0000-0001-5574-0901.

Михайленко Владислав Сергійович, доктор технічних наук, професор, Національний університет «Одеська морська академія» м. Одеса, ORCID: 0000-0002-1401-0053, SCOPUS ID 58285009400.

Михальчук Віталій Володимирович, аспірант факультету інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка, ORCID: 0000-0002-7559-999X.

Назаренко Олександр Аскольдович, доцент, кандидат фізико-математичних наук, ректор Державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку, м. Одеса, ORCID: 0000-0002-0187-0791.

Онищенко Олег Анатолійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри технічної експлуатації флоту Національного університету "Одеська морська академія", ORCID: 0000-0002-3766-3188, SCOPUS ID – 57192820689.

Охромович Михайло Миколайович, кандидат технічних наук, старший дослідник, начальник відділу-заступник начальника управління Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка, ORCID: 0000-0002-8776-3937.

Селюков Олександр Васильович, доктор технічних наук, професор, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, професор аерокосмічної школи Сіянського університету Цзяотун, Сіян, Китай, ORCID: 0000-0001-7979-3434, Scopus ID 57205509194.

Солодовник В'ячеслав Ігорович, доктор філософії, доцент кафедри телекомунікаційних систем та мереж Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, (Київ, Україна), ORCID: 0000-0002-9113-7672.

Трутнев Сергій Геннадійович, аспірант Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова, старший викладач Військової академії м. Одеса, ORCID ID: 0000-0002-6107-7920.

Шершаткін Данило Юрійович, старший викладач кафедри організації розвідувально-інформаційної роботи та технічних засобів розвідки, Військова академія, м. Одеса, ORCID: 0000-0002-3362-2469.

Яковенко Вадим Віталійович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри управління діями підрозділів десантно-штурмових військ та морської піхоти Військової академії, м. Одеса, ORCID: 0000-0001-8591-6998.

Алфавітний покажчик

Банзак О.В.	7	Зайцев Д.В.	39	Маміч В.В.	47
Банзак Г.В.	21	Зуй О.М.	54	Михайленко В.С.	54
Гайша Олена О.	31	Іванцов В.П.	67	Михальчук В.С.	91
Гайша Олександр О.	31	Коваль М.О.	106	Назаренко О.А.	21
Гахович С.В.	106	Кравченко О.І.	106	Онищенко О.А.	31
Грабовський О.В.	7	Кузавков В.В.	82	Охрамович М.М.	106
Гунченко Ю.О.	54	Лапа В.І.	82	Сєлюков О.В.	7,21
Danso J.O.	74	Лещенко В.В.	54	Солодовник В.І.	82
Дідик В.О.	47	Лєнков С.В.	7, 21	Трутнев С.Г.	115
Дружинін В.А.	74	Макаліш О.В.	67	Шершаткін Д.Ю.	47
Душкін Ю.Г.	47	Максименко Ю.А.	47	Охрамович М.М.	106

РЕДАКЦІЙНА ПОЛІТИКА ТА ЕТИЧНІ НОРМИ

ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ ТА ДОСТУП ДО ЗМІСТУ «ЗБІРНИКА ВІКНУ»

Редакційна політика «Збірника ВІКНУ» заснована на принципах об'єктивності та неупередженості при відборі статей для публікації; високих вимог до якості наукових досліджень; обов'язковості та конфіденційності рецензування статей; додержання колегіальності при відборі до публікації статей; доступності та оперативності у спілкуванні з авторами; суворого дотримання авторських і суміжних прав. Запобігання протизаконним публікаціям є відповідальністю кожного автора, редактора, рецензента, видавця.

До друку приймаються оригінальні рукописи, які не опубліковано раніше, не було відправлено до інших редакцій та які повністю відповідають вимогам щодо оформлення та порядку подання статей.

У «Збірнику ВІКНУ» сформовані наступні рубрики: військова техніка і технології подвійного призначення, інформаційні технології, загальні питання.

Редакція підтримує політику відкритого доступу та принципи вільного поширення наукової інформації. Примірники збірників знаходяться у Національній бібліотеці України ім. В.І. Вернадського, науковій бібліотеці ім. М. Максимовича, у бібліотеці Військового інституту та інших бібліотеках України. Електронна версія розміщена на сайті інституту, на сайтах наведених бібліотек та на сайтах «Збірника ВІКНУ»: <http://miljournals.knu.ua/index.php/zbirnuk>; <http://mil.univ.kiev.ua/page/lib/31>

ЕТИКА ПУБЛІКАЦІЙ

Редакційна колегія журналу вимагає від авторів наслідувати формальним та етичним правилам підготовки і публікації наукових робіт, що вони подають до редакції журналу. Ці норми зумовлено стандартами якості наукових статей, прийнятими у світовому науковому

співтоваристві, зокрема публікаційними принципами Publishing Ethics Resource Kit (PERK), рекомендаціями Elsevier, Комітету з етики публікацій (Committee on Publication Ethics, COPE), етичним кодексом вченого України, а також досвідом роботи іноземних та українських професіональних спільнот, наукових організацій, редколегій та редакцій видань.

ЕТИЧНІ ЗОБОВ'ЯЗАННЯ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ ЖУРНАЛУ

Редакційна колегія у своїй діяльності:

- керується принципами неупередженості, наукової етики рецензування, захисту – інтелектуальної власності,
- несе відповідальність за рівень наукового наповнення журналу,
- виступає проти фальсифікації, плагіату, направлення автором одного рукопису до кількох журналів, багаторазового копіювання тексту статті в різних місцях, введення громадськості в оману щодо реального внеску кожного автора в опубліковану наукову роботу;
- залишає за собою право направити рукопис на розгляд сторонньому рецензенту, у тому числі ретельний відбір через «сліпе» рецензування, відхилити статтю або повернути її на доопрацювання;
- може відхилити рукопис, якщо вважає, що він не відповідає профілю журналу, чи не відповідає етиці та правилам оформлення,
- має право вилучити вже опубліковану статтю в разі виявлення порушення будь-яких прав або загальноприйнятих норм наукової етики, про даний факт вилучення статті редакція повідомляє як автору статті, так і організації, де було виконано дослідження та повідомляє про це у наступному номері.

Співробітники редакції не надають іншим особам інформації, пов'язаної із змістом рукописів, що перебувають на розгляді, крім осіб, які беруть участь у її фаховій оцінці

Згідно з міжнародним законодавством щодо додержання авторського права на електронні інформаційні ресурси, матеріали сайту, електронного журналу або проекту не можуть бути відтворені повністю або частково в будь-якій формі (електронній чи друкованій) без попередньої письмової згоди редакції журналу. При використанні опублікованих матеріалів у контексті інших документів обов'язково необхідними є посилання на першоджерело.

ЕТИЧНІ ЗОБОВ'ЯЗАННЯ АВТОРА

Автор:

- несе відповідальність за новизну і достовірність наведених у статтях результатів, тактико-технічних та економічних показників, коректність висловлювань а також за те, що в матеріалах не міститься інформація з обмеженим доступом;
- повинен цитувати ті публікації, які мали визначальний вплив на суть викладеного у статті, а також ті, які можуть швидко ознайомити читача з більш ранніми працями, важливими для розуміння цього дослідження, необхідно також належним чином вказувати джерела принципово важливих матеріалів, використаних у даній роботі, якщо вони не були отримані самим автором;

– забезпечує недопустимість плагіату та подання до публікації раніше надрукованих матеріалів, у випадку виявлення зазначених фактів відповідальність несе автор поданих матеріалів.

Співавторами статті мають бути всі особи, що зробили вагомий науковий внесок у подану роботу і поділяють відповідальність за отримані результати. Автор, який подає рукопис до публікації, відповідає за те, щоб до списку співавторів були включені тільки ті особи, які відповідають критерію авторства, і бере на себе відповідальність за згоду інших авторів статті на її публікацію в журналі.

УВАГА!

Для авторів статей дещо доопрацьовані вимоги щодо особистих даних.

Ці данні подаються українською та англійською мовами в такій послідовності:

Прізвище_

Ім'я_

По батькові (за бажанням)_ Науковий ступінь та вчене звання_ Місце роботи та посада_

ORCID 0000-0001-3215-4400

SCOPUS ID 57193059215 (при наявності) Індекс DBLP 10 (при наявності)

e-mail:__ моб.телефон_

Надсилати скановані рисунки, формули та таблиці не допускається.

Вся стаття оформлюється одним шрифтом **Times New Roman** вказаними нижче розмірами, зверніть увагу на формули, таблиці та рисунки.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ «ЗБІРНИКА ВІКНУ» ЗДІЙСНЮЄ НЕЗАЛЕЖНЕ («СЛІПЕ») ЕКСПЕРТНЕ РЕЦЕНЗУВАННЯ НАДАНИХ ДО ДРУКУ РУКОПИСІВ ТА ПЕРЕВІРКУ ЇХ НА ПЛАГІАТ. РЕЦЕНЗУВАННЯ ЗДІЙСНЮЄТЬСЯ ЗА АНОНІМНОЮ ФОРМОЮ ЯК ДЛЯ АВТОРІВ, ТАК І ДЛЯ РЕЦЕНЗЕНТІВ.

ПОРЯДОК ПОДАННЯ І ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ ДО "ЗБІРНИКА НАУКОВИХ ПРАЦЬ ВІЙСЬКОВОГО ІНСТИТУТУ КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА"

До друку приймаються оригінальні рукописи, які не опубліковано раніше, не було відправлено до інших редакцій та які повністю відповідають вимогам щодо оформлення та порядку подання статей.

Загальні вимоги до технічного оформлення статей:

Обсяг рукопису - рекомендується **не менше 12 повних аркушів** українською або англійською мовами.

Формат аркуша - **A4 (210 x 297 мм)**.

Розмір полів: верхнє, нижнє, праве, лівє - **2 см**.

Шрифт тексту - **Times New Roman №12**, через міжрядковий інтервал - **1,0**.

Абзац має становити **10 мм**.

Стаття повинна мати такі необхідні елементи:

УДК;

назва статті, яка лаконічно відображає зміст та новизну статті;

анотація та ключові слова;

вступ та постановка задачі чи проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями;

аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано **розв'язання даної проблеми** і на які спирається автор, визначення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття, формулювання мети статті;

виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, практичних рішень та експериментів;

висновки з даного дослідження і перспективи подальшого розвитку у даному напрямку.

список літератури,

References,

дані про авторів двома мовами.

Анотація до статті виконується українською та англійською мовами загальний обсяг кожної не менш ніж **1800** знаків, включаючи ключові слова.

Вона повинна містити коротке повторення структури статті, що включає вступ, цілі і завдання, методи, результати, висновки.

Анотацію друкують курсивом, шрифт Times New Roman, №11. Після анотації розміщуються **ключові слова** (5–7 термінів).

Список літератури (References) повинен включати не менш 12 джерел, з яких 50 % видані за останні 10 років. При цьому не менш 25 % джерел повинно відноситися до іноземної періодики. Самоцитування авторів у списку літератури повинно бути, як правило, не більш за 25 %.

Якщо основною мовою статті є українська, то оформлюються два списки літератури: перший (список літератури мовою оригіналу джерела) – згідно наказу МОН від 12.01.2017 № 40 та відповідно до ДСТУ 8302:2015 «Інформація та документація. Бібліографічне посилання: загальні положення та правила складання»;

другий (REFERENCES) з урахуванням ДСТУ 8302:2015, наказу МОН від 12.01.2017 № 40 та міжнародного Гарвардського стилю BSI (British Standards Institution).

На адресу редколегії (03022, м. Київ, вул Ю. Здановської, 81, тел.: +38 (044) 521 - 33 - 82) мають бути надіслані наступні матеріали:

експертний висновок, про можливість відкритого публікування, завірений печаткою, сканкопія надсилається на е-mail: lenkov_s@ukr.net

Відомості про авторів див.на стор.150. Вимоги до оформлення References

References потрібно приводити окремим блоком, повторюючи послідовність попередньо наведеного Списку літератури. Джерела при цьому оформлюються за такими основними правилами (Harvard style оформлення BSI: British Standards Institution):

–запис завжди починається з прізвища автора, потім, через кому, ініціали (між ініціалами пропуски не ставляться), за якими в дужках вказується дата видання; два автори відокремлюються «and» без коми; кілька авторів розділяються комами, але останнє прізвище повинно бути відокремлено «and» без коми;

–витяги з публікацій, тобто назви статей журналів, глав в книгах наводять у "лапках";

–назва журналу або книги завжди виділяється курсивом;

–ім'я видавця вказується перед місцем видання;

–коми використовують для поділу елементів запису;

–для джерел українською або російською мовою, що наводяться у References, назви статей журналів, глав в книгах наводять латиницею (транслітерацією) у "лапках" та перекладом на англійську мову у квадратних дужках. Онлайн-конвертер з української мови для транслітерації: <http://translit.kh.ua/?passport>.

Приклади оформлення References за стилем Harvard British Standards Institution

Книга (ДСТУ 8302:2015)

Інформаційно-психологічна боротьба у війсьній сфері : монографія / Г.В. Певцов, А.М. Гордієнко, С.В. Залкін, С.О. Сідченко, А.О. Феклістов, К.І. Хударковський. Х. : Вид. Рожко С.Г., 2017. 276 с.

Книга (Harvard style BSI)

Pievtsov, H.V., Hordiienko, A.M., Zalkin, S.V., Sidchenko, S.O., Feklistov, A.O. and Khudarkovskyi, K.I. (2017), "Informatsiino-psykholohichna borotba u voiennoi sferi: monohrafiia" [The information and psychological struggle in the military sphere], Rozhko S.H., Kharkiv, 276 p.

Стаття із періодичного видання (ДСТУ 8302:2015)

Карпенко, Д.В. Стан та перспективи розвитку зенітного ракетного озброєння Повітряних Сил Збройних Сил України / Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2017. № 2(27). С. 75–78.

Стаття із періодичного видання (Harvard style BSI)

Karpenko, D.V. (2017), "Stan ta perspektyvy rozvytku zenitnoho raketnoho ozbroiennia Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy" [The state and perspectives of the development of anti-aircraft missile armaments in the Air Force of Ukraine], Science and Technology of the Air Force of Ukraine, No. 2(27), pp. 75–78.

Дисертація (ДСТУ 8302:2015)

Белозеров, И.В. Религиозная политика: дис. ... канд. ист. наук: 07.00.02; защищена 22.01.02; утв. 15.07.02 / Белозеров Иван Валентинович. К., 2002. 215 с.

Дисертація (Harvard style BSI)

Belozerov, I.V. (2002), "Relyhyoznaia polityka: dissertation" [The religious policy: dissertation], Kiev, 215 p.

Джерела електронного ресурсу віддаленого доступу (ДСТУ 8302:2015)

Романов В. К вопросу о путях достижения национальной безопасности в условиях глобализации: проблемы теории и практики в контексте внешней политики России и Польши [Електронний ресурс] Безопасность и оборона, 2016. № 1(2), С. 7–15. Режим доступа до журн.: http://www.desecuritate.uph.edu.pl/images/De_Securitate_12_2016.pdf.

Джерела електронного ресурсу віддаленого доступу (Harvard style BSI)

Romanov, V. (2016), "K voprosu o putyakh dostizheniya natsionalnoy bezopasnosti v usloviyakh globalizatsii: problemy teorii i praktiki v kontekste vneshney politiki Rossii i Polshi" [To the question about the ways to achieve national security in the context of globalization: the problems of theory and practice in the context of the foreign policy of Russia and Poland], Security and Defence Journal, No. 1(2), pp. 7–15, www.desecuritate.uph.edu.pl/images/De_Securitate_12_2016.pdf (accessed 12 July 2017).
(примітка: при наведенні URL "http: //" має бути виключено).

Більш детальну інформацію щодо оформлення бібліографічних посилань за стилем Harvard British Standards Institution можна знайти на сайті *Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського* та онлайн генератора посилань *Cite This For Me*.

Редакційна колегія: e-mail: lenkov_s@ukr.net

Шрифт

**СХЕМА ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ
У «ЗБІРНИКУ НАУКОВИХ ПРАЦЬ ВІКНУ»**

УДК

науковий ступінь, вчене звання

ініціали та прізвище автора (співавторів)

Місце роботи автора (співавторів)

12 пт

УДК 32.973.202:07.681

д.т.н., проф. **Степанов С.В.** (ВІКНУ)

к.т.н., с.н.с. **Українець О.В.** (ВІКНУ)

к.т.н. **Саленко В.Д.** (ВІКНУ)

12 пт

жирний

**КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИМИ ПРИСТРОЯМИ ЗА ДОПОМОГОЮ
ЖЕСТІВ**

Анотація до статті виконується українською та англійською мовами (загальний обсяг кожної не менш ніж **1800** знаків, включаючи ключові слова).

11 пт
курсів,
жирний

Для керування електронними пристроями, для сучасного користувача важливими критеріями є такі, як: зручність та простота керування. Для того щоб надати користувачу такі можливості та зручності в використанні, є досить доцільною розробка системи, яка б надавала такі можливості. Керування системою, яка працює на основі жестів, є надзвичайно перспективним, та може суттєво полегшити користувачу роботу з нею, тому що, жести які потрібні для керування системою, можуть бути інтуїтивно зрозумілими користувачу, порівняно з іншими системами які працюють за допомогою комбінацій клавіш.

Для вирішення задач керування за допомогою жестів, пропонується програмно-апаратний комплекс, який побудований на основі різних модулів, кожен з яких в свою чергу виконує відповідну роль в системі, наприклад знаходить точку інтересу з множини чи вираховує глибину сцени. Також в системі є ядро, яке відповідає за аналіз модифікаторів та жестів. На основі даних модулів стає можливо створити систему, яка б працювала на основі жестів. Але для створення даної системи, потрібно вирішити певні задачі, такі як: сегментація, скелетизація, спостереження. Кожна з яких містить в собі відповідні математичні моделі та визначення. Запропонований програмно-апаратний комплекс для керування природними жестами. Суть програмно-апаратного комплексу полягає в тому, щоб забезпечити користувача таким інтерфейсом, щоб він виконував роботу знаходячись частково віддалено від робочого місця, чи маніпулював інструментами на відстані, тобто за допомогою жестів. Використання запропонованого програмно-апаратного комплексу дозволить покращити показники стерильності в операційних, підвищити технічну безпеку під час виконання безпосередньої роботи користувача з приладами.

Ключові слова: штучний інтелект, контролери, модулі, жести, глибина сцени, точка інтересу, аналіз модифікаторів, аналіз жестів, сегментація, скелетизація, спостереження.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ СТАТТІ

12 пт

НЕОБХІДНІ ЕЛЕМЕНТИ СТАТТІ: вступ та постановка проблеми (задачі) у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується дана стаття, формулювання цілей статті (постановка завдання), виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; їх практичного значення та результатів експерименту чи впровадження; висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямку. Література. References.

УВАГА! Таблиці і рисунки друкують після посилань. Якщо у статті кілька таблиць чи рисунків - їх нумерують. Заголовки таблиць і рисунків необхідно розміщувати по центру, а нумерацію таблиць праворуч від таблиці (стиль **normal**, шрифт – **Times New**

Roman № 12). Рисунки повинні бути виконані за допомогою редактора Word, згруповані і являти собою один графічний об'єкт. Формули та позначення по тексту обов'язково набирати за допомогою Equation Editor - редактора формул Word, а не у текстовому режимі. У редакторі формул мають бути встановлені такі параметри - розміри: загальний

12 pt. великі індекси – **10 pt** , малі індекси – **7 pt**, великі символи – **14 pt.** малі символи

10 pt: стиль: текст, функції, змінні, матриці-вектори, числа – шрифт Times New Roman, для решти стилів – шрифт Symbol, при цьому: строк. грецькі – прямі. Великі за розміром вирази та рівняння необхідно записувати у кілька рядків.

ЛІТЕРАТУРА

Перший (список літератури на мові оригіналу джерела) – згідно наказу МОН № 40 від 12.01.2017 та відповідно до ДСТУ 8302:2015 «Інформація та документація. Бібліографічне посилання: загальні положення та правила складання»;

другий (REFERENCES) з урахуванням ДСТУ 8302:2015, наказу МОН № 40 від 12.01.2017 та міжнародного Гарвардського стилю BSI (British Standards Institution).

ЛІТЕРАТУРА:

11 пт

ЗРАЗОК

1. Ленков С.В., Толлок І.В., Цицарев В.М., Ленков Є.С. Моделювання процесів витрачання та поповнення ресурсу угруповання технічних об'єктів. Системи озброєння і військова техніка. Харків. 2018. Вип. 1(53). С. 155 – 162.

2. Жиров Г.Б., Ленков Є.С., Цицарев В.М., Проценко Я.М. Моделювання процесу відмов об'єктів, що відновлюються з ієрархічною конструктивною структурою. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Київ. 2017. Вип. 55. С. 30-39.

REFERENCES:

11 пт

ЗРАЗОК

1. Lienkov, S.V., Tolok, I.V., Tsytsarev, V.N. and Lenkov, Ye.S. (2018), "Modeliuvannia protsesiv vytrachannia ta popovnennia resursu uhrupuvannia tekhnichnykh ob'ektiv" [Modeling of processes of expenditure and resource replenishment grouping of technical objects], Systems of Arms and Military Equipment, No. 1(53), pp. 155-162.

2. Zhyrov, G.B., Lenkov, Ye.S., Cycarjev, V.M. and Procenko, Ja.M. (2017), "Modeljuvannja procesu vidmov ob'ektiv, shho vidnovljujut'sja z ierarhichnoju konstruktivnoju strukturoju" [Simulation of the process of failure of objects that are restored with a hierarchical constructive structure], Zbirnyk naukovykh prac' Vijs'kovogo instytutu Kyi'vs'kogo nacional'nogo universytetu imeni Tarasa Shevchenka, No. 55, pp. 30-39

Dr. econ. sci. Prof. Stepanov S.V.,

Ph.D. Ukrainets O.V., Ph.D. Salenko V.D. CONTROL

ELECTRONIC DEVICES USING GESTURES

For management of electronic devices, for today's user important criteria are: convenience and ease of management. In order to provide the user with such opportunities and usability to use, it is quite reasonable to develop a system that would provide such opportunities. Managing a gesture-based system is extremely promising, but can greatly facilitate the user to work with it, because the gestures that are needed to manage the system can be intuitive to the user, compared to other systems that operate using keyboard shortcuts. To solve the problems of managing using gestures, a software-hardware complex is proposed that is based on different modules, each of which in turn plays an appropriate role in the system, for example, finds a point of interest from a plurality or calculates the depth of a scene. Also, the system has a kernel that is responsible for analyzing modifiers and gestures. Based on the data of the modules it becomes possible to create a system that would work on the basis of gestures. But for the creation of this system, it is necessary to solve certain problems, such as: segmentation, skeletalization, observation. Each of them contains the corresponding mathematical models and definitions. Proposed hardware and software complex for management of natural gestures. The essence of the software and hardware complex is to provide the user with such an interface that he was performing work while being partially remote from the workplace, or manipulating tools at a distance, that is, using gestures. The use of the proposed software-hardware complex will improve the sterility parameters in the operating system, increase the technical safety during the direct work of

the user with the devices.

Keywords: *artificial intelligence, controllers, modules, gestures, depth of the scene, point of interest, analysis of modifiers, gesture analysis, segmentation, skeletonization, observation.*

Дані про авторів див.стор.150

ЗРАЗОК

11 пт

Степанов Сергій Вікторович, доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, головний науковий співробітник Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка, ORCID – 0000-1202-6512-1234, ORCID ID 0000-0001-3215-4400, SCOPUS ID 57193059215 (при наявності), індекс DBLP 10 (при наявності), e-mail:stepanov@ukr.net, тел. 068 652 26 62.

Українець Олексій Васильович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка, ORCID – 0000-1204-6512-1235, ukr@ukr.net, 073 556 6776. SCOPUS ID 57193059215 (при наявності), індекс DBLP 10 (при наявності), e-mail:stepanov@ukr.net, тел. 068 652 26 62.

Саленко Володимир Дмитрович, кандидат технічних наук, науковий співробітник Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка, ORCID – 0000-1201-6512-1236, salenko@ukr.net, 0938763423. SCOPUS ID 57193059215 (при наявності), індекс DBLP 10 (при наявності), e-mail:stepanov@ukr.net, тел. 068 652 26 62.

Stepanov Sergij, doctor of technical sciences, professor, Chief Researcher of the Military Institute of Kiev National Taras Shevchenko University (Kiev, Ukraine)

Ukrainets Oleksij, candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of the Military Institute of Kyiv National Taras Shevchenko University (Kiev, Ukraine)

Salenko Volodymyr, candidate of engineering sciences, Researcher of the Military Institute of Kiev National Taras Shevchenko University (Kiev, Ukraine).

ДЛЯ ПОДАТОК

Наукове видання



ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Військового інституту

**Київського національного університету імені
Тараса Шевченка**

№ 84

Усі матеріали надруковані в авторській редакції

Підписано до друку 22.11.2024 р.

Авт. друк. арк. 9,25. Формат 60х90/8

Безкоштовно. Замовлення № 53-24.

Надруковано у навчальному тренувальному комплексі ВІКНУ

Київ, вул. Ю. Здановської, 81

т. 521-32-89

