

Міністерство освіти і науки України

Системні технології

System technologies

2 (145) 2023

Регіональний міжвузівський збірник наукових праць

Засновано у січні 1997 року.

У випуску:

- ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ОРГАНІЗАЦІЯ СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА**
- МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ**
- СИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ
ТА КІБЕРБЕЗПЕКА**

Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (145). - Дніпро, 2023. – 152 с.

ISSN 1562-9945 (Print).

ISSN 2707-7977 (Online).

Редакційна колегія випуску:

Алпатов А.П. - д.т.н., проф. (відп. редактор)
Архипов О.Є. - д.т.н., проф.
Білозьоров В.Є. - д.ф.-м.н., проф.
Бабічев С.А. (Чеська Республіка) - д.т.н., доц.
Єрьомін О.О. - д.т.н., проф.

Прогресивні інформаційні
технології та організація
сучасного виробництва

Гече Ф.Е. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гуда А.І. - д.т.н., проф.
Гнатушенко Вік.В. - д.т.н., проф.
Скалозуб В.В. - д.т.н., проф.

Математичне
та програмне забезпечення
інтелектуальних систем

Гнатушенко В.В. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гожий О.П. - д.т.н., проф.
Кіріченко Л.О. - д.т.н., проф.
Светличний Д.С. (Польща) - д.т.н., проф.
Хандецький В.С. - д.т.н., проф.

Системні технології
обробки інформації
та кібербезпека

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради
Українського державного університету науки і технологій
від 23.01.2023 р., № 4

Адреса редакції: 49600, Дніпро, пр. Гагаріна, 4
Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»
кафедра Інформаційних технологій та систем.
Тел. +38(097)6854525
E-mail: st@nmetau.edu.ua
<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

© Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»,
ІБК «Системні технології», 2023

APPROXIMATION OF THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF HIGH-TEMPERATURE GAS

Annotation. For the numerical study of high-temperature gas-dynamic processes, approximating dependences of the thermophysical properties of air on temperature are proposed. The approximation error averaged over the temperature series does not exceed 0.87%.

Air at high temperatures in terms of molecular transport properties is quite close to other loose multicomponent partially dissociated and ionized gas mixtures, such as products of rocket fuel combustion in a rocket engine nozzle.

The advantage of the approach to the development of approximating dependences of the physical properties of high-temperature gases is the possibility of their use in multifunctional software packages for numerical simulation and engineering analysis.

The approximating dependences of thermo physical properties were used to study by means of the ANSYS software package the processes occurring in the nozzles of rocket engines. The physical characteristics of the air, calculated according to the proposed dependences, ensured that the polytropic index corresponded to the data on the combustion products of a real rocket engine. A mechanism is proposed for matching data from different sources due to the deterioration of the approximation in the vicinity of the boundary. The use of the technique for well-consistent data is acceptable and does not lead to a noticeable decrease in the approximation quality near the boundary. An approach is proposed for approximating multiparameter dependencies.

Keywords: high-temperature gas-dynamic processes, thermophysical properties, approximation, multi-parameter approximation, data matching.

Introduction. The solution of practical problems arising in the study of high-temperature gas-dynamic processes occurring in multicomponent media involves the use of a large data array characterizing the thermophysical properties of gases in the operating range of temperatures and pressures. Modern algorithms for solving gas dynamics problems have high accuracy and the initial data on the physical properties of gases should not yield to the general requirements for the solving accuracy of the gas dynamics and heat transfer equations themselves.

The thermophysical properties of substances are most often presented in the form of tabular dependencies on one (temperature or pressure) or two (temperature and pressure) parameters. The main tasks are to select analytical dependencies that can describe tabular data with satisfactory accuracy and to determine the parameters of these approximating dependencies. This approach helps to compress and to smooth (where necessary) the data. It also allows you to apply analytic differentiation.

The possibility of analytical setting of the physical properties of working bodies is integrated into the advanced multifunctional programs for numerical simulation and engineering analysis. Figure 1 shows the user interface window of the ANSYS program, demonstrating that, when using the program for numerical calculations, the properties of working bodies (the thermal conductivity of an ideal gas in Fig. 1) can be set by a constant value, piecewise linear, piecewise polynomial or polynomial law.

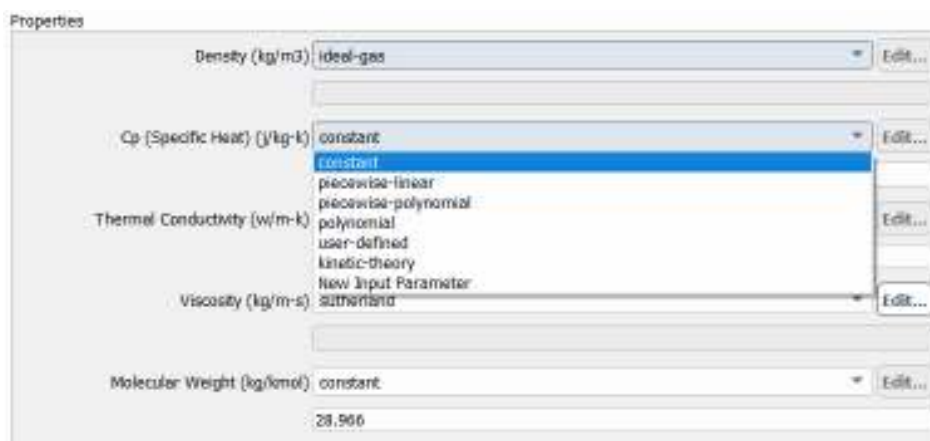


Figure 1 - Methods for setting thermal conductivity in the ANSYS software package

The optimal law for setting the values of the thermophysical properties of the working fluid allows you to speed up the calculation process and improve the results.

The purpose of this work is to develop a mechanism for constructing approximating formulas for complex temperature dependences, such as the thermophysical properties of multicomponent partially dissociated gas mixtures. To study high-temperature gas-dynamic processes using the ANSYS software package it's necessary to construct approximating temperature dependences for the thermophysical properties of air.

Despite the important role of air as an atmosphere and technical gas, there are quite a few direct definitions of the thermodynamic properties of air. Such charts and tables [1-9], which have been published, are limited to a range of temperature or

pressure, or both. Although there are convenient tables for air as an ideal gas [1,8], there are no published tables that contain a complete consistent value set for the thermodynamic properties of air, considered as a real gas, in the range of temperatures and pressures required in modern research and development.

Air at high temperatures in terms of molecular transport properties is quite close to other loose multicomponent partially dissociated and ionized mixtures of gases, such as, for example, combustion products of rocket fuel.

In the region below 1500°K, the air composition is assumed to be fixed, and corrections for gas defects are significant. Here, experimental state data and other relevant data are required for an adequate representation. At temperatures above 1500°K in this pressure range, the corrections for gas imperfections are small, and the dissociation degree of the air components has a predominant effect on the thermodynamic properties. In this area, the air properties are based on the contribution of each of the molecular and atomic varieties presenting in the equilibrium composition at each temperature and pressure [5, 6, 10].

Main research.

The thermophysical properties of air were approximated for numerical calculations by the ANSYS software package for the controlled supersonic gas flow in a rocket engine nozzle and for numerical experiments on the methods of perturbing the nozzle gas flow. Computational studies were carried out taking into account changes in the main thermophysical parameters depending on temperature and taking into account dissociation processes. The average calculated temperature was 3458°K, pressure 1 bar. The physical characteristics of the working gas ensured that the polytropic index corresponded to the data on the combustion products of a real rocket engine. The calculation results are verified by experimental data.

As a result of the analysis and generalization of the data [1 - 10] for the specific heat C_p (J/kg/K), thermal conductivity λ (W/m/deg) and viscosity μ (Pa·s), three analytical formulas depending on the temperature range were obtained.

The specific heat capacity is approximated with a reasonable degree of accuracy by the following polynomials:

– in the temperature range from 100°K to 1000 K

$$c_p = -1,5736 \cdot 10^{-17} T^7 + 6,5402 \cdot 10^{-14} T^6 - 1,1111 \cdot 10^{-10} T^5 + 9,9286 \cdot 10^{-8} T^4 - 5,035 \cdot 10^{-5} T^3 + 0,0149 T^2 - 2,3688 T + 1161,482;$$

– in the temperature range from 1000°K to 3000°K

$$c_p = 1,1123 \cdot 10^{-19}T^7 - 1,5655 \cdot 10^{-15}T^6 + 9,2375 \cdot 10^{-12}T^5 - 2,9367 \cdot 10^{-8}T^4 + 5,4216 \cdot 10^{-5}T^3 - 0,058013T^2 + 33,70605T - 7069,814;$$

– in the temperature range from 3000°K to 3600°K

$$c_p = -3,0 \cdot 10^{-9}T^4 - 5,0 \cdot 10^{-5}T^3 - 0,2523T^2 - 579,39T + 491209.$$

The integration of the analytical specification of thermophysical properties into the ANSYS program is shown in Fig. 2, demonstrated the user interface window, in which the coefficients of the approximating formula for the heat capacity and the limits of its application are set



Figure 2 - Setting the approximating formula for thermal conductivity in the ANSYS software package

For the thermal conductivity of gaseous air at a pressure of 1 bar, according to the tables [2], the following polynomial dependences are defined for various temperatures.

– in the temperature range from 200°K to 1900°K

$$\lambda = -3,5 \cdot 10^{-15}T^4 + 2,0 \cdot 10^{-11}T^3 - 4,35 \cdot 10^{-8}T^2 + 9,0 \cdot 10^{-5}T + 0,0012;$$

– in the temperature range from 1900°K to 3000°K

$$\lambda = 8,625 \cdot 10^{-11}T^3 - 4,94 \cdot 10^{-7}T^2 + 0,0001T - 0,59;$$

– in the temperature range from 3000°K to 3600°K

$$\lambda = 5,035 \cdot 10^{-10}T^3 + 4,689 \cdot 10^{-6}T^2 - 0,0142T + 14,3026.$$

The viscosity is approximated by the following polynomials:

– in the temperature range $T = 200 \text{ K} \div 1000.00 \text{ K}$

$$\mu = 1,361 \cdot 10^{-14}T^3 - 4,199 \cdot 10^{-11}T^2 + 7,0 \cdot 10^{-8}T + 8,17 \cdot 10^{-7};$$

– in the temperature range $T = 1000 \text{ K} \div 2000 \text{ K}$

$$\mu = -8,0 \cdot 10^{-15}T^3 + 3,713 \cdot 10^{-11}T^2 - 2,9 \cdot 10^{-8}T + 4,235 \cdot 10^{-5};$$

– in the temperature range $T = 2000 \text{ K} \div 3600 \text{ K}$

$$\mu = 5,98 \cdot 10^{-16} T^3 - 2,95 \cdot 10^{-12} T^2 + 3,0 \cdot 10^{-8} T + 1,6 \cdot 10^{-5}.$$

Multi-parameter dependences of the substance properties are mainly presented in the form of tables for one of the parameters (let's call this parameter primary; as a rule, this is temperature) with a number of fixed rest values, secondary (for example, pressure). Approximation of such dependencies involves the initial stage of processing, which consists in choosing the smallest possible number of dependency types on the primary parameter that well approximates the data in all tables for a given property. Next, coefficients of approximating dependencies for each table are found. Usually, the number of these coefficients, as well as the number of tabular values of the secondary parameter, is small, and to calculate the desired property, the procedure that combines functional approximation with respect to the primary parameter with interpolation with respect to the secondary can be the most convenient.

A more consistent approach is to study and then functionally approximate the dependence of each of the coefficients on the secondary parameters. At the same time, since functions of a more general form are used than is necessary for each of the tables separately, interdependence of some coefficients is often found, which is clearly visible when one of them is varied in the vicinity of the optimal value. Such interdependence can manifest itself only in a certain subrange of changes in the secondary parameter and, in principle, is convenient for describing the dependences of the coefficients on the secondary parameter, and since at smoothing the data in the mentioned subrange, suboptimal solutions are obtained that are not much worse than the optimal one. According to this fact, the approximation of the coefficients should be carried out sequentially, refining the values of the remained ones.

In cases of inconsistency of data from different sources, an artificial matching of separately constructed dependences is performed due to the deterioration of the approximation in the vicinity of the boundary. Note that the use of this technique for well-consistent data is also quite acceptable and does not lead to a noticeable decrease in the approximation quality near the boundary.

Let us illustrate the method of data matching by the example of a parameter described by the function $f(T, p)$ of two variables referred to the critical values of temperature T and pressure p . Let suppose the dependence $T_s(p)$ of temperature on pressure is known, for example, on the saturation line and the dependence of the parameter on saturated vapor pressure $f_s(p)$ (here and below, relative temperature and pressure are meant). For a smooth transition from data on the boundary to data inside the region of the function definition scopes $f(T, p)$, one can use for $p < 1$ an auxiliary function of the general form:

$$f^*(T, p) = f(T, p) + [f_s - f(T_s, p)]\varphi(T - T_s),$$

where the values of f_s and T_s are determined at pressure p , and the weight function $\varphi(x)$, такая что $\varphi(0) = 1$, and rapidly tends to zero as x increases. As a function of φ the following dependence can be proposed:

$$\varphi(x) = \begin{cases} (1 - \frac{x}{T^* - T_s})^m, & T < T^*; \\ 0, & T \geq T^* \end{cases}, \quad \varphi(x) = \exp\left(-\frac{kx}{T^* - T_s}\right), T^* > T_s.$$

The values of the parameters T^* , m , k are selected empirically.

A more reliable method, albeit giving less smooth data matching, is a linear interpolation between the data at the boundary and at some point inside the region of the described property:

$$f^*(T, p) = \begin{cases} f_s + [f(kT_s, p) - f_s] \frac{T - T_s}{(k - 1)T_s}, & T < kT_s; \\ f(T, p), & T \geq kT_s. \end{cases}$$

The coefficient $k > 1$ is chosen from the condition of the best approximation of the transition region and it can be a function of pressure or T_s .

Below there are graphical dependences of the gas constant of N_2O_4 vapors on pressure and temperature, constructed from tabular data, as well as the corresponding analytical dependences obtained using the developed tool.

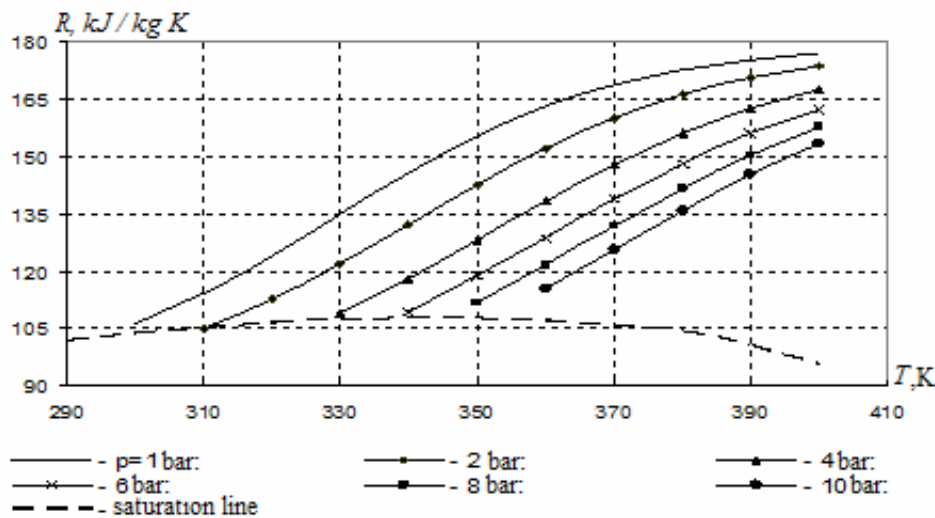


Figure 3 - Graphs of N_2O_4 gas constant versus pressure and temperature

The approximating function has the form
at $\bar{T} > 0$

$$R = R_s + R_1(\bar{T}) + R_2(\bar{T}),$$

where $R_2(\bar{T}) = R'_s T_{kp} (e^{-f_1 \bar{T}/0,120721} - e^{-10\bar{T}})/10$,

$$f_1 = (\bar{T}/0,120721)^{f_2-1}; \quad f_2 = 3,50982 - 2,7909T_s/T_{kp};$$

R_s and R'_s – the values of the gas constant and its derivative on the saturation line, respectively;

$$\bar{T} = (T - T_s)/T_{kp}.$$

For $\bar{T} < 0$ or $\bar{T} = 0$ we accepted $R = R_s$.

Conclusions. To study the high-temperature gas-dynamic processes occurring in the nozzles of rocket engines using the ANSYS software package, approximating temperature dependences for the thermophysical properties of air have been developed. The approximation error averaged over the temperature series does not exceed 0.87%.

The approach for approximating multiparameter dependencies is proposed.

A mechanism is proposed for matching data from different sources due to the deterioration of the approximation in the vicinity of the boundary. The use of this technique for well-consistent data is also quite acceptable and does not lead to a noticeable decrease in the approximation quality near the boundary.

REFERENCES

1. Wasserman A.A. Thermophysical properties of air and its components / A.A. Wasser-man, Ya. Z. Kazavchinsky, V. A. Rabinovich. - M.: Academy of Sciences of the USSR. Publishing house "Nauka", 1966. - 375 p.
2. Vargaftik N. B. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids / N. B. Vargaftik. - M.: Publishing house "Nauka", 1972. - 720 p.
3. Aerodynamics in questions and tasks: textbook. manual for technical colleges / N. F. Krasnov, V. N. Koshevoy, A. N. Danilov and others; ed. N. F. Krasnova. - M.: Higher. school, 1985. - 759 p.
4. Thermophysical properties of technically important gases at high temperatures and pressures: reference book / V. N. Zubarev, A. D. Kozlov, V. M. Kuznetsov et al. - M.: Energoatom-izdat, 1989. - 232 p.
5. Sokolova I. A. Properties of molecular transfer of dissociated and ionized gas mixtures / I. A. Sokolova, G. A. Tirsky. - Moscow, 1973. - 183 p.
6. NACA. Review of the properties of thermodynamic, transport and chemical reactions of high-temperature air [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.comcol.ru>.
7. D'Angola A. Thermodynamic and transport properties in equilibrium air plasmas in a wide pressure and temperature range / A. D'Angola, G. Colonna, C. Gorse, and M. Capitelli // Eur. Phys. J. - D 46.- 2008. - P. 129 - 150.

DOI: 10.1140/epjd/e2007-00305-4.

8. Table_A_9_CC_Properties_of_Air.pdf [Електронний ресурс] . – Режим доступу: https://www.me.psu.edu/cimbala/me433/Links/Table_A_9_CC_Properties_of_Air.pdf.

9. Tables of Thermodynamic and Transport Properties of Air, Argon, Carbon Dioxide, Carbon Monoxide Hydrogen, Nitrogen, Oxygen, and Steam / By Joseph Hilsenrath, Charles W. Beckett, William S. Benedict, Lilia Fano, Harold J. Hoge Joseph F. Masi, Ralph L. Nuttall, Yeram S. Touloukian, Harold W. Woolley // National Bureau of Standards. – Circular 564 . – Issued November 1. – 1955

10. Hirschfelder J. Molecular theory of gases and liquids / J.Hirschfelder, C.Curtis, R. Byrd. - M., 1961. - 120 p.

11. Efficiency of rocket engine thrust vector control by solid obstacle on the nozzle wall / Genadii Strelnikov, Oleksandr Ihnatiev, Nataliya Pryadko, Katerina Ternova // Proc IMechE Part G: J Aerospace Engineering. – 2022. –Vol. 0(0). – P.1–10. IMechE 2022 DOI: 10.1177/09544100221083714.

Received 01.03.2023.

Accepted 03.03.2023.

Апроксимація теплофізичних властивостей високотемпературного газу

Для чисельного дослідження високотемпературних газодинамічних процесів запропоновано апроксимуючі залежності теплофізичних властивостей повітря від температури. Середня по температурному ряду похибка апроксимації не перевищує 0,87%. Перевагою даного підходу є їх використання у багатофункціональних програмних пакетах чисельного моделювання та інженерного аналізу. Апроксимуючі залежності теплофізичних властивостей використовувалися для дослідження засобами програмного пакету ANSYS процесів, що протікають у сопла ракетних двигунів. Запропоновано підхід для апроксимації багатопараметричних залежностей.

Токарева Олена Леонідівна – молодший науковий співробітник Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України.

Ігнат'єв Олександр Дмитрович – старший науковий співробітник Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України, к.т.н.

Прядко Олександр Валерійович – інженер 1 категорії Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України

Tokareva Olena Leonidivna – junior researcher of Institute of Technical Mechanics NAS of Ukraine and SSA of Ukraine;

Ihnatiev Oleksandr Dmitrievich – senior researcher of Institute of Technical Mechanics NAS of Ukraine and SSA of Ukraine;

Priadko Oleksandr Valerievich – engineer of 1 category of Institute of Technical Mechanics NAS of Ukraine and SSA of Ukraine

МОДЕЛЮВАННЯ ВДУВУ ПРОДУКТІВ ДЕТОНАЦІЇ В НАДЗВУКОВУ ЧАСТИНУ СОПЛА

Анотація. Актуальність тематики даної роботи визначається необхідністю розробки системи уникнення зіткнення ракети з елементами космічного сміття. Мета роботи - чисельне моделювання процесу вдуву продуктів детонації в сопло ракетного двигуна. Отримано залежності відносної бокової сили від кута вдуву продуктів детонації в камеру згорання з плином часу. Розглянуто структуру потоку за картинами розподілу швидкості в соплі. Розроблена схема може використовуватись для маневрування верхнього ступеня перспективної ракети-носія, для уникнення зіткнення її з елементами космічного сміття.

Ключові слова: вдув, детонаційний двигун, закритична частина, керування вектором тяги, сопло.

Постановка проблеми. Тенденції сучасного ракетобудування передбачають використання кластерних запусків. Більшість сучасних та перспективних верхніх ступенів ракет-носіїв повинні виводити на навколоземні орбіти у різні точки простору по декілька космічних апаратів різної маси. Дана схема приваблива максимальним використанням потенціалу ракети-носія, хоча і має недоліки. При послідовному розвантаженні космічного ступеня від об'єктів різних мас виникає його масова асиметрія, тому на окремих ділянках польоту на ступінь діятимуть додаткові детерміновані збурюючі моменти, величина яких може в кілька разів перевищувати допустимі. Це зумовлює необхідність в керуючих зусиллях, які мають порядок тяги маршових двигунів верхніх ступенів, що не завжди енергетично вигідно [1]. Окрім того, можлива аварійна ситуація через невідстикування одного з космічних апаратів. Такі випадки відомі.

На сьогодні задача виведення на орбіту космічного апарату ускладнюється проблемою космічного сміття. Тому в найближчому майбутньому на систему керування буде покладена не тільки задача керування польотом, дотримання програмної траєкторії руху, а й маневри ухилення від космічного сміття [2].

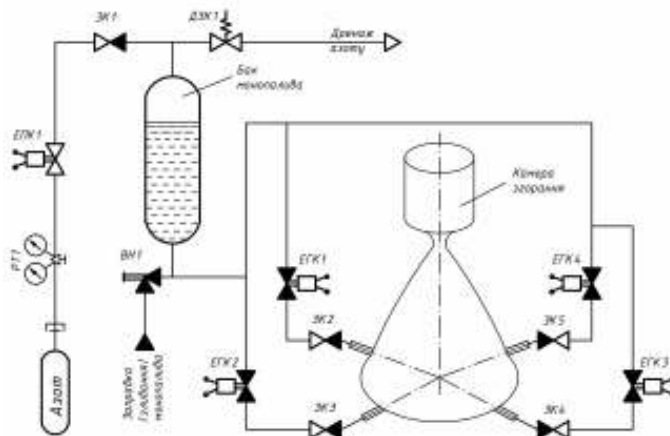
Для підвищення надійності керування польотом ракети та її стабілізації на орбіті необхідно, щоб задачі парирування одиночних не розрахункових збурюючих моментів виконувала допоміжна система керування космічним ступенем ракети. Космічні ступені ракет-носіїв в більшості випадків мають великий діаметр і малу довжину і, як об'єкти керування, характеризуються власною динамічною та структурною нестійкістю, у зв'язку з чим суттєво зростають вимоги до швидкодії виконавчих органів системи керування, до точності величини та часу дії керуючих зусиль [3, 4]. Париувати одиночні нерозрахункові збурюючі моменти пропонується не головною керуючою системою, а іншою допоміжною.

Мета роботи – чисельне моделювання процесу вдуву продуктів детонації в сопло ракетного двигуна для створення альтернативних способів керування вектором тяги ракетного двигуна верхнього ступеня.

Найбільшою швидкістю при керуванні літальним апаратом характеризується газодинамічна система. Принцип її роботи засновано на вдуві в надзвукову частину сопла рідини чи газу, який взаємодіє з основним потоком.

Детонація – це процес вибухового перетворення, зумовлений проходженням ударної хвилі по вибуховій речовині та ініціацією хімічних реакцій відразу за нею. Він протікає з постійною для даної вибухової речовини і для даного її стану надзвуковою швидкістю, яка лежить в діапазоні 1,2 – 9 км/с. На відміну від горіння детонація мало залежить від зовнішнього тиску і температури [7]. Тому застосування детонації в ракетних двигунах дозволяє наблизити характеристики органів керування до необхідного рівня, що дозволило б реалізувати системи керування космічним ступенем ракети з можливістю активного маневрування для уникнення зіткнення з елементами космічного сміття.

В роботах [8, 9] проведено чисельне моделювання, в ході якого було визначено, що поперечний вдув продуктів детонації доцільно розміщувати на зрізі сопла. Дана стаття є продовженням досліджень і зорієнтована на вивчення структури потоку в соплі під час його збурення детонаційною хвилею. Схема системи керування вектором тяги вдувом продуктів детонації рідкої вибухівки в надзвукову частину сопла проілюстрована на рис.1.



ВН 1 – вентиль; РТ 1 – редуктор тиску; (ЗК 1 – ЗК 5) – зворотні клапани;
ЕПК 1 – електропневмоклапан; ДЗК 1 – дренажно-запобіжний клапан;
(ЕГК 1 – ЕГК 4) – електрогідроклапани

Рисунок 1 – Пневмогідросхема системи керування вектором тяги
на рідкій вибухівці

Моделювання проводилося в нестационарній плоскій постановці при кутах до осі камери згорання 90° , 60° , 45° , 30° та паралельно осі, -0° . Місце розташування детонаційного газогенератора знаходилося близько зрізу сопла. За прототип вибрано двигун 11Д25 третього ступеня ракети-носія «Циклон-3». Моделювання проводилося в прикладному програмному пакеті SolidWorks. Розв'язок рівнянь Нав'є-Стокса в ньому реалізується методом кінцевих об'ємів. Чисельним моделюванням було виявлено, що вплив детонаційної хвилі на основний потік газу в соплі викликає два силових фактори [8,9]. Для перпендикулярного вдуву перший силовий фактор обумовлений реактивною силою при викиданні продуктів детонації в сопло та зоною підвищеного тиску на тій стінці, де розміщено детонаційний газогенератор. Оскільки газогенератор знаходиться на зрізі сопла, то продукти детонації досить швидко покидають сопло. В цей час ударна хвиля досягає протилежної стінки і, відбиваючись, створює зону підвищеного тиску на ній. Це другий силовий фактор, який обумовлений зміною розподілу тиску по поверхні сопла. Його вплив проявляється стрибком значення бокової сили в протилежну сторону до значення близько 100 % (рис. 2). Його напрямок співпадає з напрямком вдуву продуктів детонації, і зворотній до першого. Втрачаючи інтенсивність ударна хвиля з часом «виноситься» потоком з сопла. при цьому на стінці, на якій розміщено детонаційний газогенератор, зона підвищеного тиску також зменшується. Це знижує компенсацію впливу ударної хвилі на протилежній стінці, що і відображається стрибком відносної бокової сили до значення близько 60 %. При вдуві продуктів детонації з кутом

меншим від 90° ударна хвиля не досягає протилежної стінки сопла. Для кутів 30° , 45° та 60° графіки бокової сили подібні (рис. 2) і обумовлені лише створенням реактивної сили виходом продуктів детонації з газогенератора та локальним підвищенням тиску на стінці сопла на тій же стороні, де розміщено газогенератор.

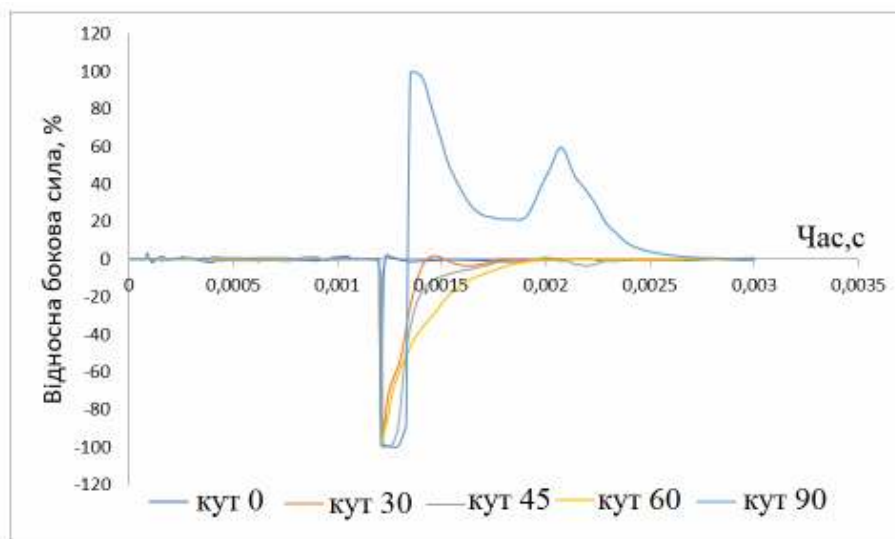
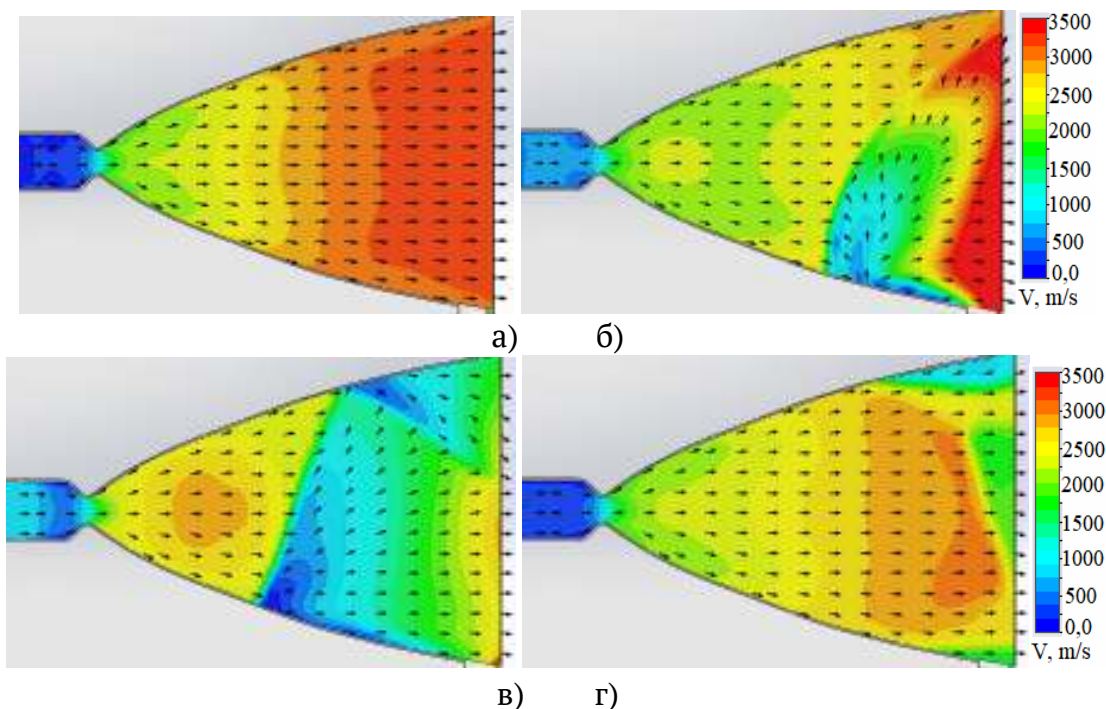


Рисунок 2 – Залежність відносної бокової сили від часу

Структуру потоку можна оцінити за картинами розподілу швидкості по соплу. Для кута 90° та для інших варіантів вони принципово різняться, тому проаналізуємо два випадки - 90° та 45° (рис. 3, 4).

В обох випадках вихід продуктів детонації ініціює ударну хвилю великої інтенсивності, яка переміщується проти надзвукового потоку, гальмуючи його. При цьому за ударною хвилею росте тиск і, відповідно, на стінці з'являється бокова сила. За векторами швидкості на зрізі сопла можна судити, що крім розподілу тиску бокову силу також створює змінений потік газу з сопла, тобто це невід'ємні частини одного процесу. Для кута вдуву 90° також видно відбиття ударної хвилі від протилежної сторони. Там також гальмується потік, підвищується тиск і створюється бокова сила, але оскільки вона на протилежній стінці сопла, то і напрям її протилежний. Вона компенсує імпульс, отриманий камерою від початкового розповсюдження ударної хвилі і виходу маси з газогенератора. З часом інтенсивність ударної хвилі знижується, швидкість зменшується і потік «виносить» її з сопла. В обох випадках видно зниження швидкості на зрізі і, відповідно, тяги. Тобто є зниження питомого імпульсу. Його можна компенсувати реактивною силою від викиду маси з газогенератора зі швидкістю, що лежить в діапазоні 5 - 7 км/с. Але тоді вихід продуктів детонації потріб-

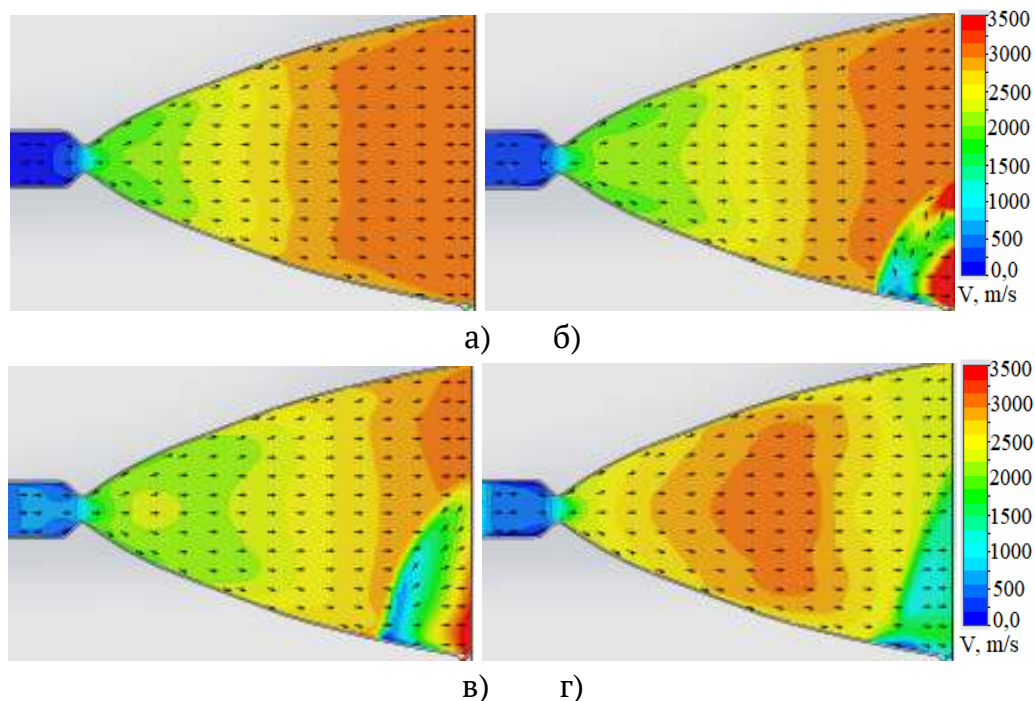
но орієнтувати по осі камери згорання. Для створення бокової сили можна використовувати тільки вплив ударної хвилі на надзвуковий потік.



а) до детонаційного вдуву; б) 0,0001с після вдуву;

в) 0,0003с після вдуву; г) 0,001с після вдуву

Рисунок 3 – Розподіл швидкості по соплу при куті вдуву 90°



а) до детонаційного вдуву; б) 0,0001с після вдуву;

в) 0,0005с після вдуву; г) 0,001с після вдуву.

Рисунок 4 – Розподіл швидкості по соплу при куті вдуву 45°

Однак, моделювання такого випадку показало дуже мале значення імпульсу бокової сили, оскільки через знаходження виходу газогенератора на краю сопла процес взаємодії відбувається за зрізом. Тому наступним кроком в дослідженні може бути оптимізація місця розміщення газогенератора, орієнтованого паралельно осі сопла.

Висновки

Розроблено схему системи керування вектором тяги ракетного двигуна впливом детонаційної хвилі на потік газу в його соплі. Проведено чисельне моделювання процесу вдуву продуктів детонації в сопло при різних кутах нахилу детонаційного газогенератора до осі камери згорання. Розроблена схема вдуву продуктів детонації в сопло може використовуватись для маневрування верхнього ступеня перспективної ракети-носія, для уникнення зіткнення її з елементами космічного сміття.

ЛІТЕРАТУРА

1. Коваленко Т.А. Космические ступени как объект управления / Т.А. Коваленко, Ю.Д. Шептун // Информационные технологии в управлении сложными системами: сборник докладов. – 2011. – С. 210 – 213.
2. Василів С.С. Застосування детонації для керування напрямком вектору тяги ракетного двигуна / С. С. Василів, Г. О. Стрельников, Н. С. Прядко // Журнал «InterConf» (78). – 2021. – С. 272 – 282.
3. Динамическое проектирование ракет. Задачи динамики ракет и их космических ступеней / И. М. Игдалов, Л. Д. Кучма, Н. В. Поляков, Ю. Д. Шептун. – Днепропетровск : ДНУ, 2010. – 264 с.
4. Ракета как объект управления / И. М. Игдалов, Л. Д. Кучма, Н. В. Поляков, Ю. Д. Шептун / под ред. С. Н. Конюхова. – Днепропетровск : Арт – Пресс, 2004. – 544 с.
5. Ерохин Б.Т. Теоретические основы проектирования РДТТ / Б.Т. Ерохин. – М. : Машиностроение, 1986. – 206 с.
6. Шишков А.А. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива / А. А. Шишков, С. Д. Панин, Б. В. Румянцев. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
7. Физика взрыва / под ред. Л.П. Орленко. - М. : Физматлит, 2002. – 823 с.
8. Василів С.С. Спосіб управління вектором тяги ракетного двигуна вдувом продуктів детонації в надзвукову частину сопла / С. С. Василів // Abstracts of VII International Scientific and Practical Conference. (November 02-06, 2020). – London, Great Britain, 2020. – P. 691 – 693.

9. Василів С. С. Керування вектором тяги ракетного двигуна вдувом продуктів детонації в надзвукову частину сопла / С. С. Василів, Г. О. Стрельников // Технічна механіка. – 2020. – №4. – С. 29 – 34.

REFERENCES

1. Kovalenko T.A. Space steps as an object of control / T. A. Kovalenko, Yu. D. Sheptun // Information technologies in the management of complex systems: a collection of reports. – 2011. – P. 210 – 213.
2. Vasiliv S.S. SDirect detonation for direct correction of the thrust vector of a rocket engine / S. S. Vasiliv, G. O. Strelnikov, N. S. Pryadko // Journal «InterConf» (78). – 2021. – P. 272 – 282.
3. Dynamic design of missiles. Problems of dynamics of rockets and their space stages / I.M. Igdalov, L.D. Kuchma, N.V. Polyakov, Yu.D. Sheptun. – Dnepropetrovsk: DNU, 2010. – 264 p.
4. Rocket as an object of control / I.M. Igdalov, L.D. Kuchma, N.V. Polyakov, Yu.D. Sheptun / ed. S.N. Konyukhova. – Dnepropetrovsk : Art - Press, 2004. – 544 c.
5. Erokhin B.T. Theoretical foundations for the design of solid propellant rocket engines / B. T. Erokhin. – M. : Mechanical engineering, 1986. – 206 p.
6. Shishkov A.A. Working processes in solid propellant rocket engines / A. A. Shishkov, S. D. Panin, B. V. Rummyantsev. – M.: Mechanical engineering, 1988. – 240p.
7. Explosion physics / ed. L. P. Orlenko. - M. : Fizmatlit, 2002. – 823 p.
8. Vasiliv S.S. A method of controlling the thrust vector of a rocket engine by blowing detonation products into the supersonic part of the nozzle S. S. Vasiliv // Abstracts of VII International Scientific and Practical Conference. (November 02-06, 2020). – London, Great Britain, 2020. – P. 691 – 693.
9. Vasiliv S.S. Control of the thrust vector of a rocket engine by blowing detonation products into the supersonic part of the nozzle / S.S. Vasiliv, G.O. Strelnikov // Technical mechanics. – 2020. – №4. – P. 29 – 34.

Received 01.03.2023.

Accepted 03.03.2023.

Study of the flow structure during the injection of detonation products into the supersonic nozzle

The gradual unloading of the space stage by undocking objects from it or an emergency situation due to the undocking of one of the spacecraft leads to mass asymmetry. In outer space there is also the problem of the collision of a space object with elements of space debris. Therefore, the relevance of the topic of this work is determined by the need to develop a system for avoiding the collision of a rocket with elements of space debris

and controlling the flight, observing the programmed trajectory of movement. The gas-dynamic aircraft system is characterized by the highest speed control. Injection of detonation products into the supercritical part of the nozzle was used as a gas-dynamic system. Modeling was carried out in the SolidWorks application software package. The purpose of the work is to develop alternative methods of the thrust vector control of the upper stage rocket engine. The scheme of the system for the thrust vector control of a rocket engine by the effect of a detonation wave on the gas flow in its nozzle has been developed. The simulation was carried out in a non-stationary flat model at angles to the axis of the combustion chamber of 90°, 60°, 45°, 30° and parallel to the axis, - 0°. The location of the detonation gas generator was near the nozzle section. Numerical simulation revealed that the impact of the detonation wave on the main gas flow in the nozzle causes two power factors. The first force factor is due to the reactive force when detonation products are thrown into the nozzle and on the wall of the high pressure zone where the detonation gas generator is located. The second force factor is due to the change in pressure distribution on the nozzle surface, where high pressure zone creates reflecting on it. The dependence of the relative lateral force on the injection angle of detonation products into the combustion chamber over time has been obtained. The structure of the flow according to the patterns of the velocity distribution in the nozzle during the injection of detonation products is also considered. In cases when the injection is blown at 90° and 45°, the release of detonation products initiates a shock wave of high intensity, which moves against the supersonic flow, retarding it. The developed scheme can be used for maneuvering the upper stage of a prospective launch vehicle to avoid its collision with elements of space debris.

Василів Степан Степанович – к.т.н., науковий співробітник Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України.

Тернова Катерина Віталіївна – к.т.н., старший науковий співробітник Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України.

Vasyliv Stepan Stepanovych - Ph.D., researcher at the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and DKA of Ukraine.

Ternova Kateryna Vitaliyivna - Ph.D., senior researcher, Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine,

O.M. Hrechanyi, T.O. Vasilchenko, V.V. Badlo,
M.V. Chuvalskyi, O.O. Padalka, V.V. Parkhomenko

ANALYSIS OF CONSTRUCTIVE FACTORS AFFECTING THE FATIGUE STRENGTH OF METALLURGICAL EQUIPMENT PARTS

Annotation. The causes of fatigue failure of metallurgical equipment parts were analyzed. The correlation between the effect of the quality of surface treatment of the part on the fatigue strength has been established. The influence of local stress concentrators on fatigue strength has been determined. Recommendations for increasing the fatigue strength of the finished part were given.

Key words: fatigue failure, stress concentrators, endurance limit

Statement of the problem

The specific conditions of operation of metallurgical equipment, caused not only by dynamic loads, but also by the specialties of the course of the technological process, require attention when designing their units considering reliability and trouble-free operation [1].

In addition to ensuring reliability during operation, the components of the technological equipment must allow for easy adjustment, and in case of emergency breakdowns, allow for quick replacement or repair of individual components or parts, which in turn strengthens the already strict design restrictions in the development of components and aggregates of the metallurgical complex [2].

On the other hand, in the system for assessing the technical condition of mechanical systems according to individual risk indicators of their elements - risk analysis - failures of individual nodes or parts are "ranked" depending on the level of damage [3], i.e. the situation of advance planning of more extended service periods for the most responsible parts of nodes of metallurgical equipment is economically justified.

Thus, establishing the factors affecting the fatigue strength of parts at the stage of their design is an important task, the solution of which will allow not only to use materials more rationally, but also to extend the life cycle of the part as a whole.

Analysis of recent research and publications

As you know, fatigue is a rather complex process of accumulation of material damage under the influence of variable stresses. This process is gradual, extended over time and leads to a change in properties, the formation of cracks, their development and destruction. Its feature is that the accumulation of damage begins long before the final loss of performance of the part and proceeds imperceptibly. Statistical data show that the main reason for about 80% of equipment failures is fatigue failure [4]. Thus, in terms of reliability and durability of metallurgical equipment units, the problem of fatigue strength comes to the fore.

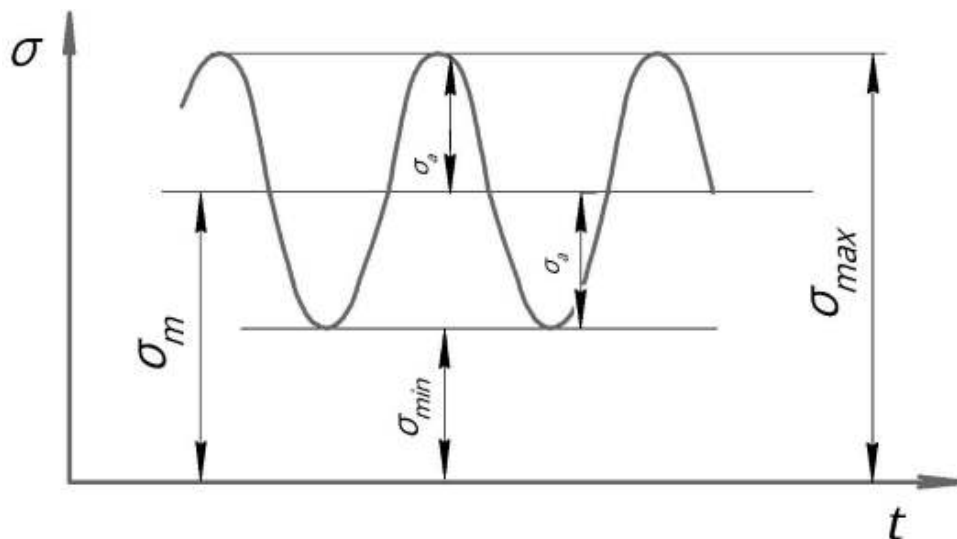
Cyclic loads are the main cause of fatigue failure. The parameters characterizing any cycle of alternating stresses are shown in Figure 1.

Cycle asymmetry coefficients – R_σ or R_τ – is equal to the ratio (taking into account the sign) of the minimum stress to the maximum [5]:

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \text{ or } R_\tau = \frac{\tau_{\min}}{\tau_{\max}} \quad (1)$$

Depending on the value of the asymmetry coefficient, cycles are distinguished:

- symmetrical ($R = -1$, $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$, $\sigma_m = 0$);
- pulsating ($R = 0$, $\sigma_{\min} = 0$, $\sigma_m = 0,5\sigma_{\max}$);
- asymmetrical ($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$, $\sigma_{\max} \neq \sigma_{\min}$, $\sigma_m \neq 0$).



$\sigma_{\max}$ ($\tau_{\max}$), MPa – the greatest in terms of the algebraic value of cycle tension;

$\sigma_{\min}$ ($\tau_{\min}$), MPa – the smallest in terms of the algebraic value of the stress of the cycle;

σ_m (τ_m), MPa – average cycle stress

Figure 1 – Parameters characterizing the cycle of alternating stresses

Endurance limit or fatigue limit is the maximum stress at which the material does not break under an almost unlimited number of stress changes [5].

Endurance limits are determined experimentally. The most common type of endurance tests under uniaxial stress is bending and strain tests.

The results of fatigue tests have a significant dispersion, so the construction of fatigue curves is preceded by statistical processing of experimental data. Fatigue curves (Fig. 2) are built in natural or semi-logarithmic coordinates based on the results of testing samples of 15–20 samples at each load level [6].

Endurance limit depends on values σ_m and σ_a . The graphic interpretation of this dependence is the diagram of the limit amplitudes (Fig. 3).

The meaning of the diagram of limit amplitudes is that if you set the point M with coordinates σ_m and σ_a that characterize the cycle (Fig. 3, a), then by location of the point M you can evaluate the strength of the sample. The area of the diagram below the curve is the safe stress area.

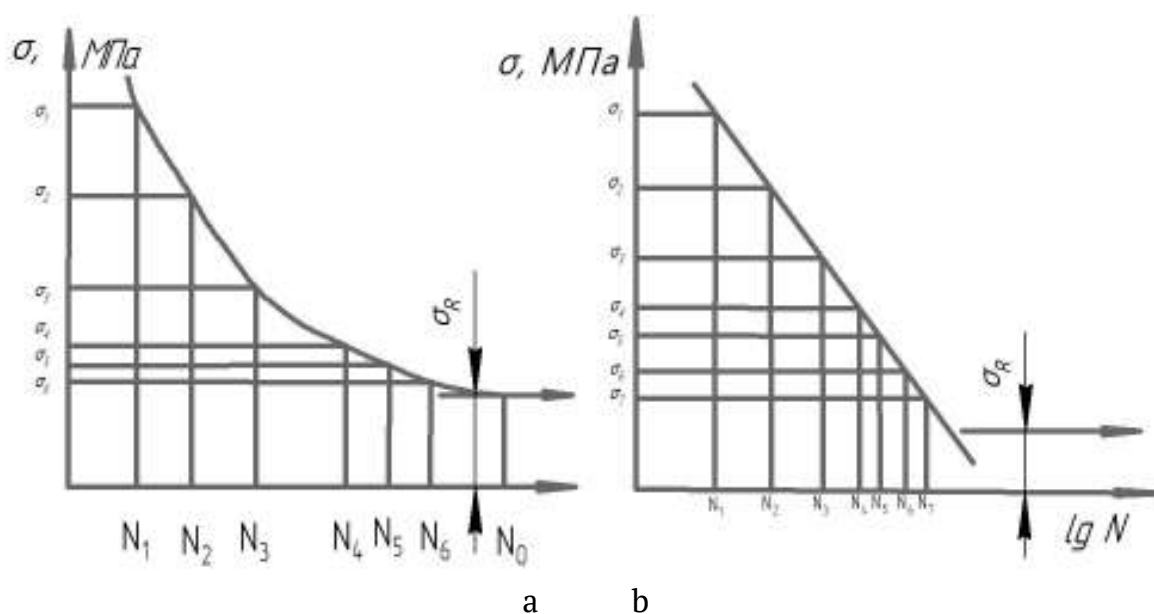


Figure 2 – Fatigue curves in natural (a) and semi-logarithmic coordinates (b)

Schematic diagram is used for calculation purposes in practice since obtaining a diagram of the limit amplitudes requires considerable time spent on testing samples for various combinations of σ_m and σ_a , (Fig. 3, b).

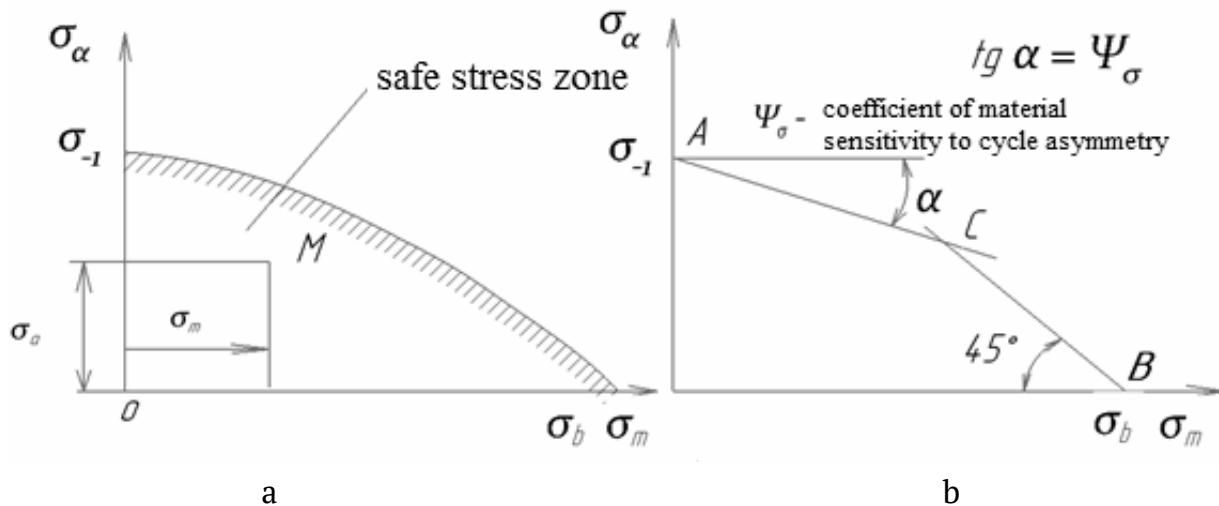


Figure 3 – Diagram of limit amplitudes in natural (a) and schematic (b) types

The performance of metallurgical equipment units is usually determined by the basic structures, such as various types of frames, casings [7], which consist to a greater extent of the same type of parts, the strength of which is a decisive factor for the life cycle of the entire unit.

It should be noted that the strength of parts under variable loads is always lower than the strength of smooth samples. Therefore, when calculating the durability of parts, it is necessary to take into account the influence of a number of factors on the reduction of strength characteristics.

Purpose of the study

The fatigue life of parts depends on many factors, the main of which are the size of the parts (scale factor), stress concentration, quality (roughness) of the surface of the part. Durability also depends on the chemical composition of the material, its structure, modes of thermal and mechanical processing, surface hardening, temperature, aggressiveness of the environment, etc. The purpose of the study was to establish the relationship between the influence of such factors as the quality of surface treatment of the finished part and stress concentrators.

Statement of the main research material

Given the fact that fatigue crack initiation occurs on the surface or near the surface layers [8], it can be concluded that the condition of the surface of the part has a significant effect on the resistance to fatigue failure, and is one of the main characteristics of the volumetric mechanical properties of the parts.

Fatigue strength can be increased by improving the quality of the surface layer by its plastic deformation (rolling, shot blasting, etc.) [9] or by thermal and thermochemical treatment (surface hardening, nitriding, cyanidation, etc.) [10].

In the first case, the strengthening is created due to the compaction of the outer layers and the introduction of residual compressive stresses into them, which contributes to increased durability.

During thermal and thermochemical treatment, the structure, chemical composition, and physical and mechanical properties of the surface layer change, which also cause compression stresses [11].

Taking into account the effect of surface quality [12] on fatigue strength can be performed by entering into the calculation the surface quality coefficient, which is determined [5,13]:

$$\beta_{\sigma} = \frac{\sigma'_R}{\sigma_R}, \quad (2)$$

or

$$\beta_{\tau} = \frac{\tau'_R}{\tau_R} \quad (3)$$

where σ'_R τ'_R – endurance limit of samples with a given surface treatment;

σ_R , τ_R - endurance limit of carefully polished samples;

On the other hand, numerous experimental studies of parts show that in places of sharp changes in the shape of the cross-section, in the presence of slots, leaks, holes, grooves, etc., as well as in places of contact of parts, increased local stresses occur (Fig. 4). Therefore, stress concentration should be considered as a local or local increase in stress caused by a sharp change in the cross-section of the part and the presence of macrodefects in the structure [14].

The strength of parts with stress concentrators under the action of static loads practically depends on local stresses [15].

It is also worth considering that with cyclically changing stresses in the zone of the stress concentrator, a microcrack is creating, which gradually develops into macrocracks and weakens the cross-section of the part to such an extent that a sudden brittle fatigue failure occurs [8].

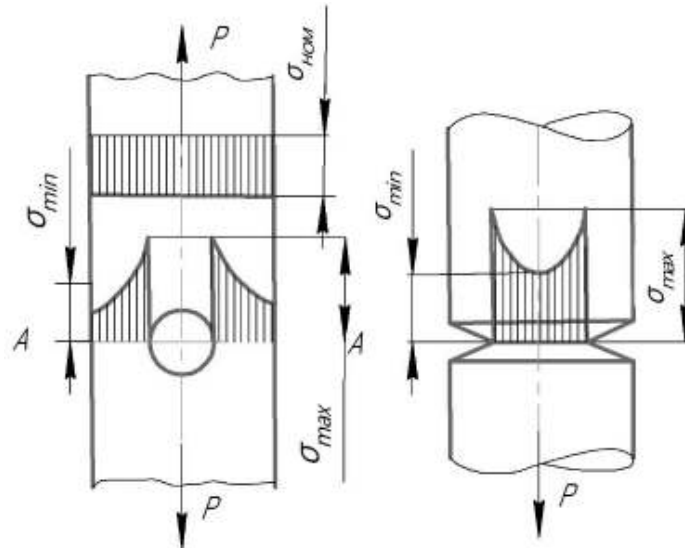


Figure 4 – To determine stress concentrators

Taking into account the influence of stress concentration on the reduction of endurance is carried out by entering into the calculation the effective concentration coefficient, which is determined [13]:

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_R}{\sigma_{RK}}, \quad (4)$$

where σ_R – endurance limit of smooth samples;

σ_{RK} – the endurance limit of samples with stress concentrators and cross-sectional dimensions are the same as those of smooth samples;

Numerical values of K_{σ} for the most typical stress concentrators are given in the reference literature. In the absence of reference data, K_{σ} can be determined approximately by the formula:

$$K_{\sigma} = 1 + q(\alpha_{\sigma} - 1) \quad (5)$$

where q – coefficient of sensitivity of the material to local stresses, for structural steels $q=0,6-0,8$;

α_{σ} – theoretical coefficient of stress concentration.

It is worth noting that when the size of the samples increases, the endurance limit decreases, especially in the presence of stress concentrators. This is due to the fact that the natural increase in the size of the part increases the number of material particles located near the surface and which are in the most stressed state. At the same time, the probability of the presence of various defects in the surface layer, which cause stress concentration, increases. With smaller parts, during mechanical

processing, plastic deformation occurs to a relatively greater depth than with large parts, which also contributes to an increase in fatigue strength.

Conclusions Therefore, when designing parts of metallurgical equipment, taking into account the effect of stress concentration is possible by introducing the sensitivity coefficient of the material (4). When varying the coefficient of sensitivity of the material to local stresses in (4) in the numerical range from 0.6 to 0.8, it causes a decrease in the fatigue strength of the finished part by 20-40% in relation to smooth samples. Minimization of local stress concentrators such as holes, notches, cutouts, protrusions, as well as sharp changes in the cross-section of the part, will allow to increase the fatigue strength of the finished part in relation to the smooth sample by at least 20%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Influence of technological process parameters on equipment dynamic factor / O. Hrechanyi et al. System technologies. 2021. Vol. 3, no. 134. P. 3–12. URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-134-2021-01>
2. Гречаний О.М. Обґрунтування вибору технічних параметрів гільйотинних ножиць прокатного стану. Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії. 2017. Т. 38, № 2. С. 126–130.
3. Application of risk-analysis methods in the maintenance of industrial equipment / S.V. Belodedenko et al. Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 22. P. 51–58. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.01.007>
4. Налобіна О.О. Конструювання вузлів та агрегатів : Метод. вказівки (конспект лекцій). Рівне : НУВГП, 2019. 83 с.
5. Васильченко Т.О, Шевченко І.А, Гречаний О.М. Опір матеріалів : навчально-методичний посібник. Запоріжжя : ЗНУ, 2020. 263 с.
6. ISO 1143:2021. Metallic materials – Rotating bar bending fatigue testing. – Replaces ISO 1143:2010 ; effective from 2021-07-01. – Official edition. – [S. l. : s. n.], 2021. – 26 p.
7. Витривалість при складному напруженому стані в аспекті подовження ресурсу технологічного устаткування промислових виробництв / С. В. Білодіденко та ін. Теорія і практика металургії. 2021. № 4. С. 56–68. URL: <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2021.07>
8. Belodedenko S., Grechany A., Yatsuba A. Prediction of operability of the plate rolling rolls based on the mixed fracture mechanism. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1, no. 7 (91). P. 4–11. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.122818>

9. Дяченко С.С. Матеріали різного призначення, їх обробка та властивості: навчальний посібник / С.С. Дяченко, І.В. Дощечкіна, І.В. Пономаренко, С.І.Бондаренко, Х.: ХНАДУ, 2016. – 348с.
10. Acceleration of Saturation Process and Improving Nitrided Layer Properties / S. Dyachenko et al. Industrial Heating. 1998. No. 65. P. 99–105.
11. Афанасьєва О.В. Матеріалознавство та конструкційні матеріали. Навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2016. – 188 с.
12. Дзюра В. О., Марущак П. О. Технологічні методи забезпечення параметрів якості поверхонь тіл обертання та їх профілометричний контроль : монографія. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2021. 170 с.
13. Dyck T., Ober-Wörder P., Bund A. Calculation of the wear surface and the coefficient of friction for various coated contact geometries. Wear. 2016. Vol. 368-369. P. 390–399. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.10.014>
14. Degtyarev V. A. Influence of the ratio of dynamic and static stresses on brittle fracture resistance of low-alloyed steel welded joints. Automatic welding. 2017. Vol. 2017, no. 9. P. 3–9. URL: <https://doi.org/10.15407/as2017.09.01>
15. Influence of stress concentration on steel deformation 20 under cyclic loads / M. Gladyski et al. Technical sciences and technologies. 2022. No. 1(27). P. 60–66. URL: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1\(27\)-60-66](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1(27)-60-66)

REFERENCES

1. Influence of technological process parameters on equipment dynamic factor / O. Hrechanyi et al. System technologies. 2021. Vol. 3, no. 134. P. 3–12. URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-134-2021-01>
2. Hrechanyi O. M. Substantiation of the choice of technical parameters of the guillotine shears of the rolling mill. Metallurgy: scientific works of the Zaporizhia State Engineering Academy. 2017. Vol. 38, no. 2. P. 126–130.
3. Application of risk-analysis methods in the maintenance of industrial equipment / S. V. Belodedenko et al. Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 22. P. 51–58. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.01.007>
4. Nalobina O. O. Construction of nodes and aggregates: Method. instructions (lecture notes). Rivne: NUVHP, 2019. 83 с.
5. Vasilchenko T.O., Shevchenko I.A., Hrechanyi O.M. Resistance of materials: educational and methodological manual Zaporizhzhia: ZNU, 2020. – 263 p.
6. ISO 1143:2021. Metallic materials – Rotating bar bending fatigue testing. – Replaces ISO 1143:2010 ; effective from 2021-07-01. – Official edition. – [S. l. : s. n.], 2021. – 26 p.
7. Endurance under a complex stress state in the aspect of prolonging the resource of technological equipment of industrial production / S. V. Bilodidenko et al. Theory and practice of metallurgy. 2021. № 4. C. 56–68.

URL: <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2021.07>

8. Belodedenko S., Grechany A., Yatsuba A. Prediction of operability of the plate rolling rolls based on the mixed fracture mechanism. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1, no. 7 (91). P. 4–11.

URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.122818>

9. Dyachenko S.S. Materials of various purposes, their processing and properties: educational guide / S.S. Dyachenko, I.V. Doshchechkina, I.V. Ponomarenko, S.I. Bondarenko, Kh.: Khnadu, 2016. – 348с.

10. Acceleration of Saturation Process and Improving Nitrided Layer Properties / S. Dyachenko et al. Industrial Heating. 1998. No. 65. P. 99–105.

11. Afanasieva O.V. Materials science and construction materials. Education manual. - Kharkiv: KhNURE, 2016. – 188 с.

12. Dzyura V. O., Marushchak P. O. Technological methods of ensuring quality parameters of surfaces of rotating bodies and their profilometric control: monograph. Ternopil: FOP Palyanytsia V. A., 2021. – 170 p.

13. Dyck T., Ober-Wörder P., Bund A. Calculation of the wear surface and the coefficient of friction for various coated contact geometries. Wear. 2016. Vol. 368-369. P. 390–399. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.10.014>

14. Degtyarev V. A. Influence of the ratio of dynamic and static stresses on brittle fracture resistance of low-alloyed steel welded joints. Automatic welding. 2017. Vol. 2017, no. 9. P. 3–9. URL: <https://doi.org/10.15407/as2017.09.01>

15. Influence of stress concentration on steel deformation 20 under cyclic loads / M. Gladskyi et al. Technical sciences and technologies. 2022. No. 1(27). P. 60–66. URL: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1\(27\)-60-66](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1(27)-60-66)

Received 01.03.2023.

Accepted 03.03.2023.

Аналіз конструктивних факторів, що впливають на втомну міцність деталей металургійного обладнання

Специфічні умови роботи металургійного обладнання, обумовлені не тільки динамічними навантаженнями, а й особливостями перебігу технологічного процесу, вимагають уваги при конструюванні їхніх вузлів з огляду на надійність та безвідмовну роботу. Завчасне планування більш подовжених строків служби найбільш відповідальних деталей вузлів металургійного обладнання є економічно обґрунтованим, тобто встановлення факторів, що впливають на втомну міцність деталей на етапі їхнього проєктування є важливим завданням, вирішення якого дозволить не тільки більш раціонально використовувати матеріали, а й подовжити життєвий цикл деталі в цілому.

Втома є доволі складним процесом накопичення пошкоджень матеріалу під впливом змінних напружень. Цей процес є поступовим, розтягнутим у часі та

призводить до зміни властивостей, утворенню тріщин, їхнього розвитку та руйнування. Його особливістю є те, що накопичення пошкоджень починається задовго до остаточної втрати роботоздатності деталі та протікає непомітно, отже в розрізі надійності та довговічності вузлів металургійного обладнання на перший план виходить саме проблема втомної міцності.

Встановлено, що на довговічність деталей металургійного обладнання значно впливають такі фактори як якість обробки поверхні готової деталі та концентратори напружень.

Визначено, що врахування впливу якості поверхні на втомну міцність можна виконати введенням у розрахунок коефіцієнта якості поверхні. Концентрацію напружень варто розглядати як місцеве або локальне підвищення напружень, викликане різкою зміною поперечного перерізу деталі та наявністю макродефектів структури.

При конструюванні деталей металургійного обладнання врахування впливу концентрації напружень можливе введенням коефіцієнта чутливості матеріалу. При варіюванні коефіцієнту чутливості матеріалу до місцевих напружень в числових межах від 0,6 до 0,8 викликає зниження втомної міцності готової деталі по відношенню до гладеньких зразків на 20-40 %. Мінімізація таких концентраторів місцевих напружень як отвори, виточки, вирізи, виступи, а також різкі зміни поперечного перерізу деталі, дозволить підвищити втомну міцність готової деталі по відношенню до гладенького зразка мінімум на 20 %.

Гречаний Олексій Миколайович - доктор філософії (PhD), ст. викладач, кафедра металургійного обладнання, Запорізький національний університет.

Васильченко Тетяна Олександрівна - к.т.н., доцент, доцент кафедри металургійного обладнання, Запорізький національний університет.

Бадло Вадим Вадимович, магістр кафедри металургійного обладнання, Запорізький національний університет.

Чувальський Михайло Володимирович - магістр кафедри металургійного обладнання, Запорізький національний університет.

Падалка Олександр Олександрович - магістр кафедри металургійного обладнання, Запорізький національний університет.

Пархоменко Володимир Володимирович - магістр кафедри металургійного обладнання, Запорізький національний університет.

Hrechanyi Oleksii - Ph.D., lecturer, Departament Metallurgical Equipment, Zaporizhzhia National University.

Vasilchenko Tetyana - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Departament Metallurgical Equipment, Zaporizhzhia National University.

Badlo Vadym - magister of Departament Metallurgical Equipment Zaporizhzhia National University.

Chuvalskyi Mykhailo - magister of Departament Metallurgical Equipment Zaporizhzhia National University.

Padalka Oleksandr - magister of Departament Metallurgical Equipment Zaporizhzhia National University.

Parkhomenko Volodymyr - magister of Departament Metallurgical Equipment Zaporizhzhia National University.

M.A. Poliakov, P.D. Andrienko, I.Yu. Vittsivskyi, A.M. Poliakov

PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF THE INFORMATION AND CONTROL SYSTEM OF THE DEPARTMENT OF THE UNIVERSITY

Annotation. The concept of the information and control system of the university department, which trains specialists in the electrical engineering profile, is systematized. The principles of construction and the block diagram of such a system are proposed. The variants of application in the educational process are described. A feature of the proposed system is the integration of the computer and microcontroller educational infrastructure of the department with the "smart home" system of the premises of the university building.

Keywords: information and control system, department, "smart home", microcontroller boards, computer laboratory.

Formulation of the problem. The general digital transformation of society has also affected the sphere of university education. Digital transformation in the field of education and science is a priority for the Ministry of Education and Science of Ukraine. This is complex work, which includes, among other things, the creation of the necessary digital infrastructure of educational and scientific institutions, automation of data collection and analysis [1]. The achieved level of infrastructure of the university departments, with computer classes with Internet access, does not reflect all the advantages of digitalization.

Another area in which revolutionary changes are taking place is the introduction of "Smart X" type systems, where X is some object: an apartment, a house, a building, a city, a garage, a vehicle, a machine tool, etc. [2]. Unfortunately, this list does not include the university department, which increases the operating costs of the university infrastructure, reduces the level of comfort in the department's premises and the quality of the educational process.

The third component of the current situation is the full-scale introduction of distance learning with problems of remote laboratory work in technical specialties [3].

Promising for use in the information control system (ICS) of the department is the direction of the Internet of Things (IoT) [4], which implements the collection of

information from remote sensors and remote control of actuators, which is relevant in the technological processes of education.

Analysis of publications. The work [5] describes the cyber-social system Smart Cyber University (CyUni), developed at the Kharkiv Institute of Radio Electronics, which is characterized by: the presence of a digitized space of regulatory rules, accurate monitoring and active cyber control of the addressable components of scientific and educational processes, automatic generation of operational regulatory influences, independent of managers making cyber-decisions on the management of financial and human resources, the exclusion of paper media from scientific and educational processes. At the same time, the subsystem of the smart chair is not detailed in this work. On the other hand, the works [6, 7] describe the structures of individual computer laboratories of the department, but do not cover the issues of integrating these laboratories with the information system of the department leading the training in the specialty "electrical engineering".

The purpose of this work is to increase the level of digitalization of the Department of Electrical Engineering by creating an information control system that integrates the educational process that is conducted at the department with the infrastructure of the department's premises.

Presentation of the main material. The term "department" is usually used to define an element of the organizational structure of an educational institution, but not as an object of information management. In connection with the task set, we define the department as a system that is immersed in the external environment. This environment includes:

- Open space E1, which begins outside the windows of the department premises;
- Educational building E2, along the corridors of which physical access to the department is provided;
- Heating networks E3;
- Power supply networks E4;
- University Information Network E5;
- Water supply network E6;
- University telephone network E7;
- Security network E8;
- Fire alarm network E9.

Between the department and the listed elements of the environment there are material and information flows, in relation to which the department performs certain tasks given in Table 1.

To fulfill the tasks and effectively conduct the educational process, the department has the structure shown in Fig. 1.

In accordance with the principle of integration of information flows of the department, all elements of the ICS of the department are combined into a local network. The central element in this system is a computer class, which receives information flows from other elements and, in turn, is connected to the information network of the university.

Table 1

Tasks of the ICS of the department in relation to the elements of the external environment

Element designation	Task name
E1	Temperature and humidity control. Receiving solar energy
E2	Access control to the department. Corridor lighting control. Formation and display of relevant information in the corridor
E3	Accounting for water consumption and carrier temperature
E4	Power consumption control, mains voltage and current monitoring, overload protection.
E5	Network traffic control, distribution over internal networks, access control
E6	Water consumption accounting and leak detection (not considered in this paper)
E7-E9	Maintenance (not covered in this paper))

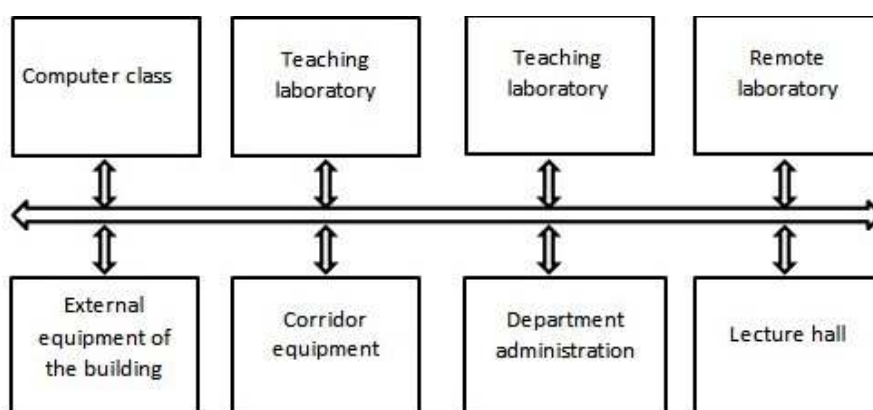


Figure 1 – The structure of the department

Educational laboratories are classrooms with special laboratory stands that do not currently have nodes with a computing resource in their composition. For example, there is the laboratory of high-voltage electrical devices.

Auditoriums are rooms in which, at the moment, there is no laboratory equipment. Under the external equipment of the building is meant the equipment placed on the outer wall or roof of the educational building. The equipment of the corridor is mounted on its walls. In the premises of the remote laboratory there are stands for laboratory work by remote students, that is, students who are in other rooms or outside the university.

The administration of the department also needs to exchange information, store the archive of the department and, therefore, the administration computer is also included in the department's local network.

The structure of the computer class is shown in Fig. 2. When building a class, the principle of integrating the processes of managing the infrastructure of the department with the educational process was used. At the same time, infrastructure management objects are studied in the educational process, and monitoring the state of infrastructure elements improves the quality of the educational process. The class structure contains three servers. WEB server provides connection with the server of the university and schedules sessions of remote experiments for students.

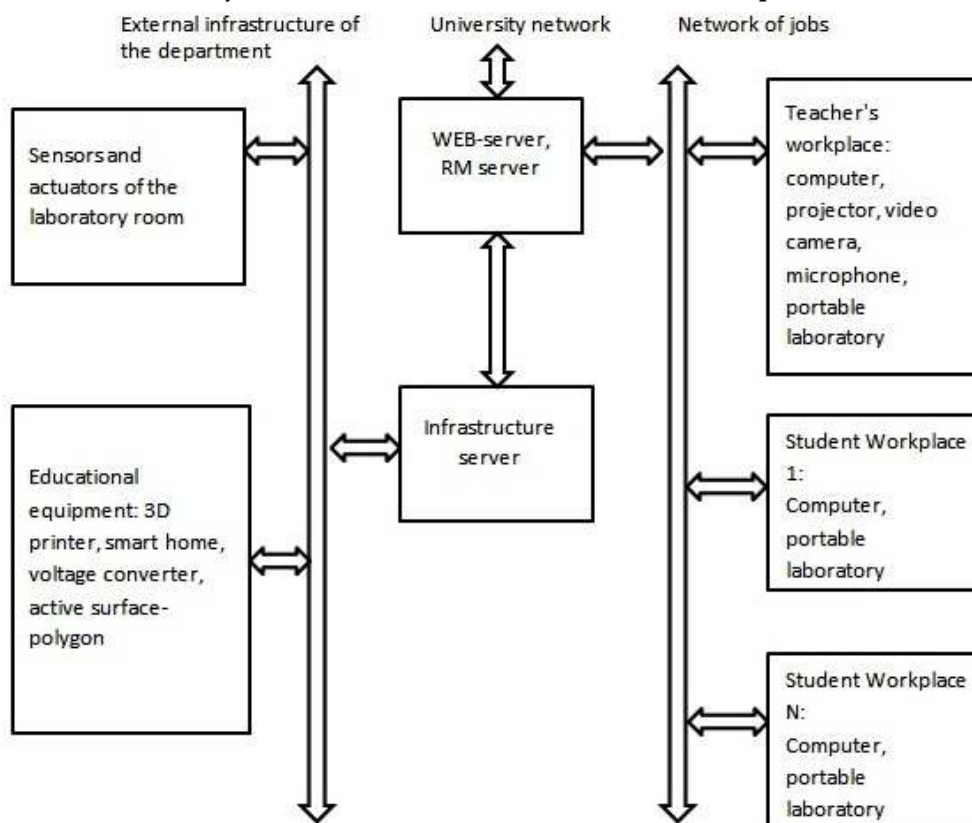


Figure 2 – The structure of the computer class of the department

The workplace server stores the necessary software, methodological materials, and results of students' laboratory work and provides Internet access for workplaces.

The infrastructure server controls the educational equipment of the computer class, receives the current values of the results of changes in various physical parameters in the classroom and stores them in disk memory. The educational equipment includes a 3D printer, on which students produce parts designed by them in CAD packages.

The "Smart Home" stand and outdoor portable weather station are designed for students to work out complex solutions for controlling sensors and actuators of the control object. Particular control tasks are worked out with the help of portable laboratories.

The voltage converter is used in conjunction with a solar battery (external building equipment) to study renewable energy sources.

An active surfaces-polygon is understood as a surface in a computer class room, along which, for a given purpose, models of vehicles equipped with microcontrollers for space sensors move. The polygon equipment dynamically changes the obstacles in the way of vehicles and the purpose of their movement. The purpose of training using an active polygon is to test the effectiveness of algorithms for overcoming obstacles. The principles of constructing active surfaces-polygon are considered in [8].

In addition, the infrastructure server controls the equipment of the computer room (lighting, air conditioning, video cameras, projector, acoustic system, access control systems) and the external infrastructure of the department.

A specific element of the workplace in a computer class is a portable laboratory. The main requirements for such a laboratory are to ensure low cost, functional completeness and flexibility, scalability of experiments, safety in operation, installation of experimental circuits without the use of soldering, compactness, ease of deployment, power supply of the experiment control circuit from a personal computer via a USB connector, use of a freely distributed software for designing control algorithms for objects of study. The principles of building such a laboratory include software control of the experiment, portability and reconfigurability.

The principles of building such a laboratory include software control of the experiment, portability and reconfigurability. These principles are implemented in the Smart EA portable laboratory [9], which consists of a set of individual stands. Each stand is stored in a separate organizer and connected to a personal computer for the duration of the laboratory work. The hardware part of the stand consists of a basic set and a variable part. The basic kit includes an Arduino Uno/Mega2560 microproc-

essor board with a USB cable, an 830-point MB 102 breadboard, a set of wires, and basic radio elements.

Basic radio elements include limiting resistors, LEDs, buttons, and a potentiometer. The elements of the stand are placed in a plastic organizer that can be carried in a student's briefcase. The price of the basic set of the stand lies within 500-1000 UAH. General view of the laboratory stand is shown in Fig. 3.



Figure 3 – General view of the portable laboratory stand

The composition of the variable part of the stand depends on the topic of the laboratory work and includes additional radio elements (seven-segment indicators, piezoelectric emitters, digital and analog microcircuits), devices (various sensors, electric motors, modules with relays, displays, keyboards) and shields - boards with some functionality that are structurally are compatible with microprocessor board contacts and reduce the number of connecting wires. A fragment of the equipment of the variable part of the stand is shown in Fig. 4.

On the personal computer to which the stand is connected, the Windows operating system must be installed, with the microprocessor board driver, the freely distributed Arduino IDE [10] design environment with the necessary libraries. Work with a real board is preceded by work with simulators of the control object. Such systems as UnoArduSim [11], TINKERCAD [12] and others, of course, are a step forward in increasing the visibility of educational experiments with programming control algorithms.

Another important direction, which is supported by the equipment of the Smart EA stand, is the study of programming languages for industrial controllers. The main problem in the field of engineering training in programming industrial controllers is

the unavailability, for economic reasons, of both the controllers themselves and the environments for programming them in the languages of the IEC 61131-3 standard [13].



Figure 4 – Elements of the variable part of the stand

Another important direction, which is supported by the equipment of the Smart EA stand, is the study of programming languages for industrial controllers. The main problem in the field of engineering training in programming industrial controllers is the unavailability, for economic reasons, of both the controllers themselves and the environments for programming them in the languages of the IEC 61131-3 standard.

At the same time, when studying object control algorithms, controller boards of the Arduino and other families, which are available for purchase, are widely used. In this case, the C programming language is used and the languages of the IEC 61131 – 3 standards are not used, which is a disadvantage of this approach.

In the computer class, the freely distributed OpenPLC platform [14] was used to teach programming of industrial controllers in the languages of the IEC 61131-3 standard. The programs developed by students are executed both in the built-in logic controller and in real controller boards, for example, from the Arduino family.

The OpenPLC platform includes a programming environment in a universal (not tied to a specific platform manufacturer of controller boards) language and a tool for loading a program into a real OpenPLC RunTime board. When configuring a project in the OpenPLC Editor environment, the programming language is selected.

Language options are Instruction Language (IL), Structured Text (ST), Ladder Diagrams (LD), Function Block Diagrams (FBD), and Sequential Function Steps (SFC). At the same time, LD, FBD, SFC languages are high-level graphic languages that contain hundreds of standard instructions available for use when building control programs in a package. The program in the LD language visually resembles a relay-contact circuit of electroautomatics. An example of a simple program for implementing the self-latching relay function is shown in Fig. 5.

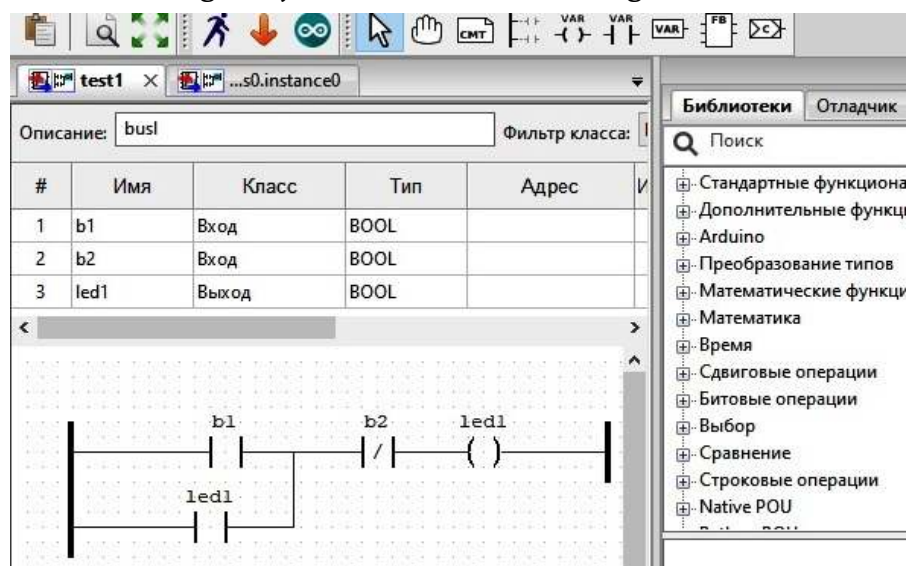


Figure 5 – Screen fragment of the OpenPLC Editor program

To bind the program variables to the pins of a specific controller board, the entries in the Address column are used. These records are generated based on the lookup tables available in the package documentation. So digital pin 2 of the Arduino Uno board configured as input will have address %IX0.0, and pin 7 configured as output %QX0.0.

The Smart EA laboratory has been introduced into the educational process of preparing bachelors in the specialties 141 - "Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics" and 172 - "Telecommunications and Radio Engineering" at the National University "Zaporozhye Polytechnic". In particular, laboratory work was carried out on the study of programming in the C language of the tasks of interfacing a microprocessor board with sensors and actuators, the implementation of automatic control algorithms, and on the study of programming in the Ladder Diagram language of the tasks of implementing logic functions, timers and counters with the execution of programs in a programmable logic simulator controller (with distance learning) and in a real Arduino Uno microcontroller.

Currently, work to expand the functionality of the portable laboratory continues. It is supposed to be used in the course “Fundamentals of electronics and microcircuitry to study the principles of building analog and digital nodes.

The corridor of the building in the context considered by the ICS is a place where a student spends a significant amount of time and it can carry an additional information load or contribute to psychological relief.

To implement these functions, it is supposed to use a plasma panel connected to one of the computers of the department. The screen of this panel displays information about the department, its employees, history and achievements; various schedules, announcements, assignments, teaching materials, videos of the best lectures of teachers.

An interesting idea of “immersion” in digitalization can be borrowed from colleagues from the University of Technology Ilmenau (Germany). This is a wall clock that shows the time in binary code (Fig. 6).



Figure 6 – Wall clock with binary digits (current time 08-54)

A useful element of corridor equipment is a lighting control subsystem, one of the modes of which is to reduce power consumption during lectures or when there is no movement along the corridor.

A useful element of corridor equipment is a lighting control subsystem, one of modes of which is to reduce power consumption during lectures or when there is no movement along the corridor.

The subsystems for monitoring the temperature and humidity conditions and controlling the lighting of the premises of the department, which have already been discussed above, should be integrated into the computer network of the department. In justified cases, student access to the premises of the department should be organized using radio frequency identification technology (RFID, Radio Frequency Identification) and the RFID RC522 module connected to the Arduino board [15].

To automate the process of experiment in the educational laboratory of the electrical profile, stands are used that contain microcontroller boards, current, voltage, temperature sensors and electricity meters. For example, it is a stand for studying thermal processes in a coil when an electric current flows through it. The stand contains a coil with built-in thermocouples. These thermocouples are connected to the analog inputs of the Arduino board. The received information is accompanied by timestamps and transferred to the server for storage and analysis. The exchange of information with the server occurs via a serial channel.

Due to the fact that almost 100% of students have laptops, and the experimental objects are small and have low power consumption, lectures and laboratory experiments can be alternated in the classrooms of the department, even within the same lesson, using the Smart EA laboratory.

In the direction of electrical engineering, students study about 10-15 departmental disciplines, for each of which, as a rule, they perform 5-10 laboratory work. If we also take into account that classes are held simultaneously for students of different years of study, not only laboratory, but also research work of students is carried out, and up to 20 students are present at one lesson, then we can estimate the scale of the problem. At present, the main ways to solve it are: cooperation of laboratories within the university, an increase in the duration of the working week of laboratories, the use of portable stands by students outside the university, cooperation of remote laboratories between universities, the use of laboratory stands based on multifunctional modules, the use of reconfigurable laboratory stands.

The key elements of the remote laboratory of the department are laboratory stands with the ability to remotely configure the electrical circuit of the experiment. Configuration involves changing the parameters and/or structure of the electrical circuit under test, input sources, loads and meters. The set of elements of such a stand is determined by the type of research object in the student's laboratory work. The reconfiguration of digital circuits is solved by forming prohibitions / permissions for the passage of logical signals in the object of research by the controller circuit of the laboratory stand. A remotely controlled change in the structure of an analog node is made using relay modules interfaced with a microcontroller, Arduino. A microcontroller-controlled change in the resistance of electrical circuits is performed, for example, using modules based on digital potentiometers (RDAC, digital POT) from leading manufacturers of integrated circuits [16].

Conclusions. The main factors influencing the process of creating information and control systems of the university department are: digitalization requirements

from the Ministry of Education and Science and university management; achievement of "smartization" of industrial, office, household facilities; internet of things; the need to adapt the laboratory complex to the conditions of online learning.

The main direction of the creation of ICS is: integration of all laboratories, classrooms, computer classes and administration of the department into a local network; the use of the computing power of the department to build a "smart space" in which the educational process takes place; transition to portable microprocessor laboratories for use both in the computer class and outside it; creation of modular remotely reconfigurable remote laboratories.

REFERENCES

1. Digital transformation of education and science. Website of the Ministry of Education and Science of Ukraine – Access mode: <https://mon.gov.ua/ua/tag/cifrova-transformaciya-osviti-ta-nauki> – March, 1, 2023 – Title from the screen.
2. Das, Samapika. Smart Classroom for Modern Education. //International Journal of English Learning and Teaching Skills. – 2020, Vol. 2, No. 3, <https://doi.org/10.15864/ijelts.2311>
3. Zhu, ZT. A research framework of smart education /ZT. Zhu, MH. Yu, P. A Riezebos// Smart Learn. Environ – 2016, 3, 4. <https://doi.org/10.1186/s40561-016-0026-2>
4. Digiteum. How IoT is used in Education: IoT Applications in Education. 2020. – Access mode: <https://www.digiteum.com/iot-applications-education> – March, 1, 2023 – Title from the screen.
5. Khakhanov V. I. Kibersotsial'naya sistema – umnyy kiber-universitet / V. I. Khakhanov, Ye. I. Litvinova, S. V. Chumachenko, A. S. Mishchenko // Radioelectronic and computer systems. – 2016, № 5 (79). P.187–194.
6. Pirrone D. Open-source multi-purpose remote laboratory for IoT education / D. Pirrone, C. Fornaro, D. Assante // In: Proceedings of the 2021 IEEE Global engineering education conference, EDUCON, IEEE, Vienna, Austria. – 2021, P. 1462-1468. <https://doi.org/10.1109/EDUCON46332.2021.9454034>.
7. Parkhomenko, A. The Application of the Remote Lab for Studying the Issues of Smart House Systems Power Efficiency, Safety and Cybersecurity /A. Parkhomenko, A. Tulenkov, A. Sokolyanskii, Y., Zalyubovskiy, A. Parkhomenko, A. Stepanenko/ In: Auer, M., Langmann, R. (eds.) Smart Industry & Smart Education. REV 2018. Lecture Notes in Networks and Systems. – 2019, vol. 47. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95678-7_44

8. Poliakov M. Expanding the Remote Experiment Set with the 3Axis Portal Physical Model/ M. Poliakov, K. Henke, J. Nau, H.-D. Wuttke, G. Tabunshchyk, A. Parkhomenko, O. Poliakov //International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE). – 2022, Vol. 18, No. 04. P. 21-30.
<https://doi.org/10.3991/ijoe.v18i04.28857>
9. Poliakov M.A. Portable laboratory for studying algorithms of control of electric devices. /M.A. Poliakov, P.D. Andrienko, I.Yu. Vittsivskyi //Current problems and access in the field of radio engineering, telecommunications and information technologies: Abstracts of the final reports of the XI International Scientific and Practical Conference (December, 12-14 2022, Zaporizhzhia). [Electronic resource] / Electron. data. – Zaporizhzhia: NU “Zaporizka Polytechnic”. – 2022. P. 204. – P.13 – 14.
10. Arduino IDE. Site BIBLPROG Windows. – Access mode:
https://biblprog.org.ua/ru/arduino_ide/ – March, 1, 2023. – Title from the screen.
11. UnoArduSim. Site UnoArduSim – Access mode:
<https://www.sites.google.com/site/unoardusim> – March, 1, 2023. – Title from the screen.
12. Autodesk. TINKERCAD – Access mode: <https://www.tinkercad.com/circuit> – March, 1, 2023. – Title from the screen.
13. Programmable controllers – Part 3: Programming languages IEC 61131-3:2013
14. OpenPLC. Site Open Source PLC Software – Access mode:
<https://openplcproject.com> – March, 1, 2023 – Title from the screen.
15. Finkenzeller K. RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and near-Field Communication, John Wiley & Sons, Ltd. Third Edition, 2010. <https://doi.org/10.1002/9780470665121>
16. Choosing the Correct digiPOT for Your Application. Site Analog Device – Access mode: https://www.analog.com/media/en/news-marketing-collateral/product-selection-guide/Choosing_the_Correct_Digipot.pdf – March, 1, 2023 – Title from the screen.

Received 01.03.2023.

Accepted 03.03.2023.

***Принципи побудови інформаційно-керуючої системи
кафедри університету***

Завдання цифровізації університету вирішуються як на верхньому кіберсоціальному рівні, так і на нижньому рівні автоматизації лабораторного обладнання. Кафедра, як об'єкт управління інформацією, що займає середній рівень в управлінській ієрархії, у відомих роботах не розглядається. Мета роботи – підвищити рівень цифровізації кафедри електротехніки шляхом створення сис-

теми управління інформацією, яка поєднують навчальний процес, що проводиться на кафедрі, з інфраструктурою приміщень кафедри. Систематизовано концепцію інформаційно-управляючої системи кафедри університету, яка здійснює підготовку фахівців електротехнічного профілю. Запропоновано принципи побудови та структурну схему такої системи, в якій об'єднані в локальну мережу комп'ютерний клас, навчальні лабораторії, адміністрація, аудиторії, віддалена лабораторія і навіть коридор навчального корпусу. Описано варіанти використання елементів ІКС у навчальному процесі та процес моніторингу параметрів обладнання та приміщень кафедри. Це включає опис портативної лабораторії для вивчення електроніки, мікропроцесорів, програмованих логічних контролерів та електричних пристроїв. Таким чином, основним напрямком цифровізації кафедри університету є створення ІКС, яка об'єднує всі лабораторії, аудиторії, комп'ютерні класи та адміністрацію кафедри в локальну мережу; використання обчислювальної потужності кафедри для побудови «розумного простору», в якому відбувається навчальний процес; перехід на портативні мікропроцесорні лабораторії для використання як в комп'ютерному класі, так і поза ним; створення модульних дистанційно реконфігурованих віддалених лабораторій.

Поляков Михайло Олексійович - д.т.н., проф., професор кафедри електричних та електронних апаратів національного університету «Запорізька політехніка»

Андрієнко Петро Дмитрієвич - д.т.н., проф., завідувач кафедри електричних та електронних апаратів національного університету «Запорізька політехніка».

Вітцівський Іван Юрійович - студент національного університету «Запорізька політехніка».

Поляков Олексій Михайлович - студент національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Polyakov Mykhailo Oleksiiovych - Ph.D., Professor, Professor of the Department of Electrical and Electronic Devices of the National University "Zaporizhia Polytechnic".

Andrienko Petro Dmitrievich - Ph.D., Prof., Head of the Department of Electrical and Electronic Devices of the Zaporizhia Polytechnic National University.

Vitsivskiy Ivan Yuriyovych - student of Zaporizhzhya Polytechnic National University.

Polyakov Oleksiy Mykhailovych - student of the National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute".

С.В. Аджамський, Г.А. Кононенко, Р.В. Подольський

**ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ
ДЛЯ ФОРМУВАННЯ СТАБІЛЬНОГО ОДИНИЧНОГО ТРЕКУ
ПРИ ТОВЩИНІ ШАРУ 30 МКМ ЗІ СПЛАВУ INCONEL 718**

Анотація. При селективному лазерному плавленні (далі -СЛП) виріб складається з множини одиничних шарів, які в свою чергу створюються з множини одиничних треків. Вплив характеристик ванни розплаву на якість побудови тривимірних деталей з різних матеріалів було широко вивчено. Пошук оптимальних технологічних параметрів є компромісом між продуктивністю і якістю процесу побудови. Для певних чинників друку (матеріалу/ обладнання/ деталі) необхідно знаходити цей оптимум, оскільки це є одним з можливих шляхів поліпшення структури та властивостей. Матеріалом, використаним в цьому дослідженні, був металевий порошок з розміром частинок від 10 до 45 мкм. Хімічний склад порошку Inconel 718 в % по масі: Cr=17,79; Ni=53,5; Mo=3,12; Mo=3,01; Ti=0,85; Nb=5,12. У даній роботі одиничні треки створювалися на базовому майданчику, виготовленому з того ж матеріалу. При цьому потужність лазера змінювали в діапазоні 100...150 Вт з кроком 10 Вт, а швидкість руху променя лазера – в діапазоні 1300...3500 мм/с з кроком 100 мм/с. Всього було досліджено 108 режимів друку одиничних треків, розташованих на відстані 1,5...2 мм один від одного. Побудовано номограму параметрів друку одиничних треків зі сплав Inconel 718 при товщині шару 30 мкм. З аналізу зовнішнього вигляду дослідних зразків встановлено, що при потужностях 100..150 Вт та швидкостях сканування 1800...3400 мм/с формується стабільний трек, а при зменшенні швидкості відбувається розбризкування та переплавлення основного металу. Слід зазначити, що зразки з перекриттям 0,05 та 0,06 мм при збільшенні швидкості сканування утворюють нестабільний трек: переривчастий, з краплеутворенням. Встановлено область раціональної щільності енергії 37...41 Дж/мм³ для побудови деталей зі сплаву Inconel 718 при товщині шару 30 мкм.

Ключові слова: селективне лазерне плавлення, одиничний трек, параметри, номограма, Inconel 718.

Вступ

При селективному лазерному плавленні (далі -СЛП) виріб складається з множини одиничних шарів, які в свою чергу створюються з множини одиничних треків. Вплив характеристик ванни розплаву на якість побудови тривимірних деталей з різних матеріалів було широко вивчено [1-4].

Малий розмір ванни розплаву призводить до зниження ефективності процесу через збільшення часу виготовлення. Велика ванна розплаву може підвищити ефективність виробництва, але може викликати випаровування підкладки або порошку, що веде до утворення пор і збільшення загальної кількості дефектів матеріалів.

Тому якість виробу, включаючи кінцеву щільність металу і шорсткість поверхні, в першу чергу, залежить від характеристик ванни розплаву (форма і розмір), які в значній мірі управляються зміною щільності енергії лазерного променю, що є по суті мірою енергії, що підводиться в процесі друку [5-6]. Управління щільністю енергії може бути досягнуто зміною відповідних параметрів, що контролюються. Потужність лазера P (Вт), швидкість сканування v (мм / с), відстань між треками (перекриття ванни розплаву) d (мм) і товщина шару t (мм) є найбільш важливими параметрами і пов'язані з щільністю енергії лазера як:

$$E = P / (V \cdot d \cdot t) \quad (1)$$

Вплив такого технологічного фактору як потужність лазера на шорсткість може змінюватися в двох напрямках: з одного боку, більш високі потужності сприяють повному переплавленню шару і надають ефект згладжування, а також з іншого боку, надмірна потужність лазера сприяє розбризкуванню розплаву і прилипанню оточуючих частинок до розплаву, що твердне, дотичному з порошком.

При дослідженні впливу щільності енергії лазера було показано, що при низькому значенні цього параметра в'язкість ванни розплаву буде високою. Отже, менше порошку буде розплавлено, і згодом буде витрачено більше часу. Проте, при низькій швидкості сканування лазером буде досягатися високий час витримки над порошком, тому буде витрачатися менше часу. Як правило, при високій щільності лазерної енергії досягається крупніша і з більш високою температурою ванна розплаву [8]. А досить велика ванна розплаву призведе до хорошого розподілу розплаву і до повністю щільного друку.

При високій щільності енергії (висока потужність і низька швидкість), спостерігається більш глибоке проникнення, яке може досягати від 5 до 25 шарів. При такій ситуації один і той же мікрооб'єм металу піддається багаторазовому переплаву, що несприятливо позначається на якості металу. Крім того, при великій глибині ванни розплаву, а отже і великому її об'ємі, виникає значний температурний градієнт між остиглим металом більш нижніх шарів і рідким металом, що призводить до формування спрямованої крупнокристалічної

мікроструктури і високих напружень, в деяких випадках і до формування мікротріщин. Зовні трек, виконаний в цій області, виглядає стабільно, майже не має зовнішніх дефектів. Однак в глибині перерізу треку утворюються великі пори, розсіяні уздовж всього треку, що для надрукованої деталі є невиправним браком.

Таким чином, пошук оптимальної швидкості сканування є компромісом між продуктивністю і якістю процесу побудови. Для певних чинників друку (матеріалу/ обладнання/ деталі) необхідно знаходити цей оптимум і це є одним з можливих шляхів поліпшення структури та властивостей виробів.

Постановка мети і завдань дослідження

Встановлення раціональних режимів друку одиничних треків, визначення оптимальної питомої енергії за робочої товщини шару порошку Inconel 718 – 30 мкм. Побудова номограми з визначенням раціональної області параметрів виготовлення треків за технологією селективного лазерного плавлення.

Методика проведення досліджень

Дослідження проводились на зразках, виготовлених з порошкового матеріалу. Друк зразків проводився на 3D принтері Alfa-150 виробництва компанії ТОВ «АЛТ Україна» [7-9]. Матеріалом, використаним в цьому дослідженні, був металевий порошок з розміром частинок від 10 до 45 мкм. Хімічний склад порошку Inconel 718 в % по масі: Cr=17,79; Ni=53,5; Mo=3,12; Mo=3,01; Ti=0,85; Nb=5,12. У даній роботі одиничні треки створювалися на базовому майданчику, виготовленому з того ж матеріалу. При цьому потужність змінювали в діапазоні 100...150 Вт з кроком 10 Вт, а швидкість – в діапазоні 1300...3500 мм/с з кроком 100 мм/с. Всього було досліджено 108 режимів друку одиничних треків, розташованих на відстані 1,5...2 мм один від одного. Кожен блок містить 6 груп з 3 одиничних треків, виготовлених за однаковими режимами. Товщина шару, що застосовувалась в експериментах – 30 мкм, діаметр променя 0,12мм.

Вихідний матеріал був досліджений за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-106 (рис. 1, а) для визначення форми і розмірів частинок. На рис. 1, б наведено результати аналізу. На рис. 2 представлена схема розташування зразків з одиничними треками.

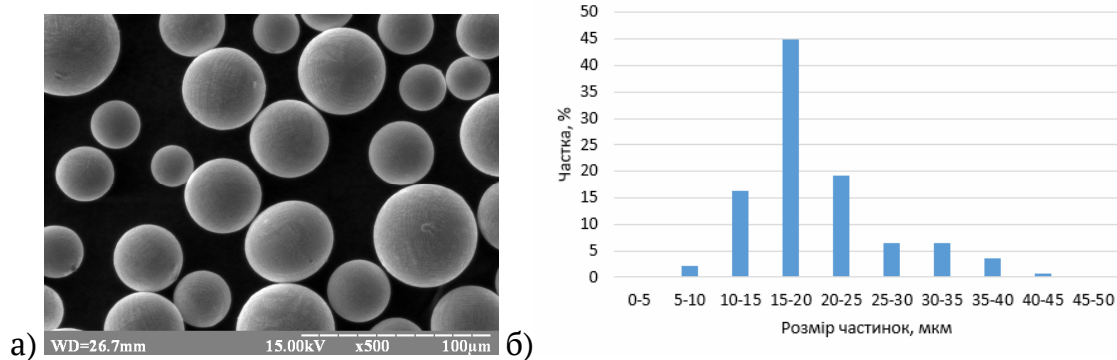


Рисунок 1 - Частинки вихідного матеріалу Inconel 718 при збільшенні 500 (а) та результати гранулометричного аналізу (б)

Розрахунок проводився на підставі умовно постійної відстані між треками 0,05 мм, 0,06 мм, 0,07 мм відповідно (табл. 1). Розміри базового майданчику: довжина – 32 мм, ширина – 7,6 мм, підтримки висотою 4-4,5 мм.

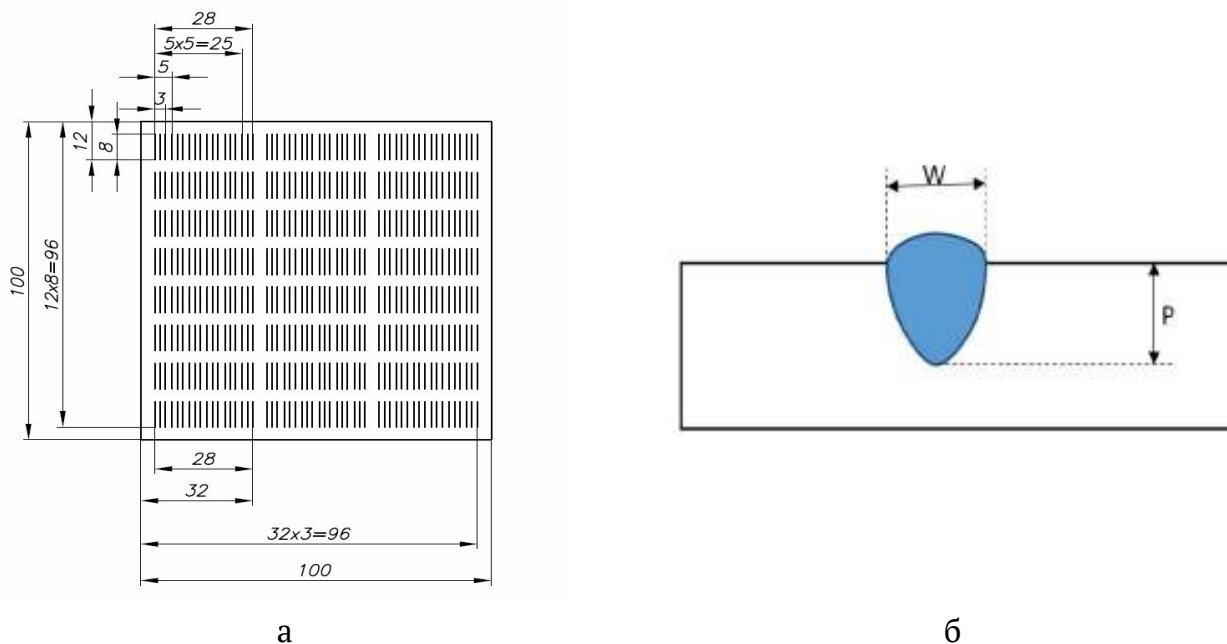


Рисунок 2 – Схема розташування досліджуваних зразків на підкладці треків (а), геометричні параметри одиничного треку (б):
W – ширина треку, P – глибина треку [1,10]

Основними геометричними параметрами одиничного треку є глибина та ширина. Схематично зовнішній вигляд одиничних треків показаний на рис. 2,б. Аналіз зовнішнього вигляду треків приведений на рис. 3.

Встановлено, що при малій потужності лазера трек нестабільний на малих швидкостях (рис. 3, а) та призводить до дефекту каплеутворення, а зі збільшенням швидкості трек не формується. При збільшенні потужності стабіль-

ність треку зростає, на малих швидкостях головка треку стає більш вираженою (рис. 3, б). При подальшому збільшенні енергії променю на хвостах треків може формуватися лунка. Зі збільшенням потужності та зменшенням швидкості сканування відбувається переплав базового майданчику та розбризування треку (рис. 3, в).

Форма і розміри головки треку найбільш залежні від впливу випадкових чинників [11-12]. В ідеальних умовах розміри головки треку визначаються величиною питомої енергії. Зі зменшенням величини питомої енергії головка треку стає все більш вираженою – її ширина і висота збільшується по відношенню до ширини і висоти сталого треку. При високих значеннях питомої енергії ця різниця зменшується, але все одно залишається. Іноді висота головки треку може перевищувати товщину шару, що призводить до зіткнення з лезом ракеля і счесування верхівки головки.

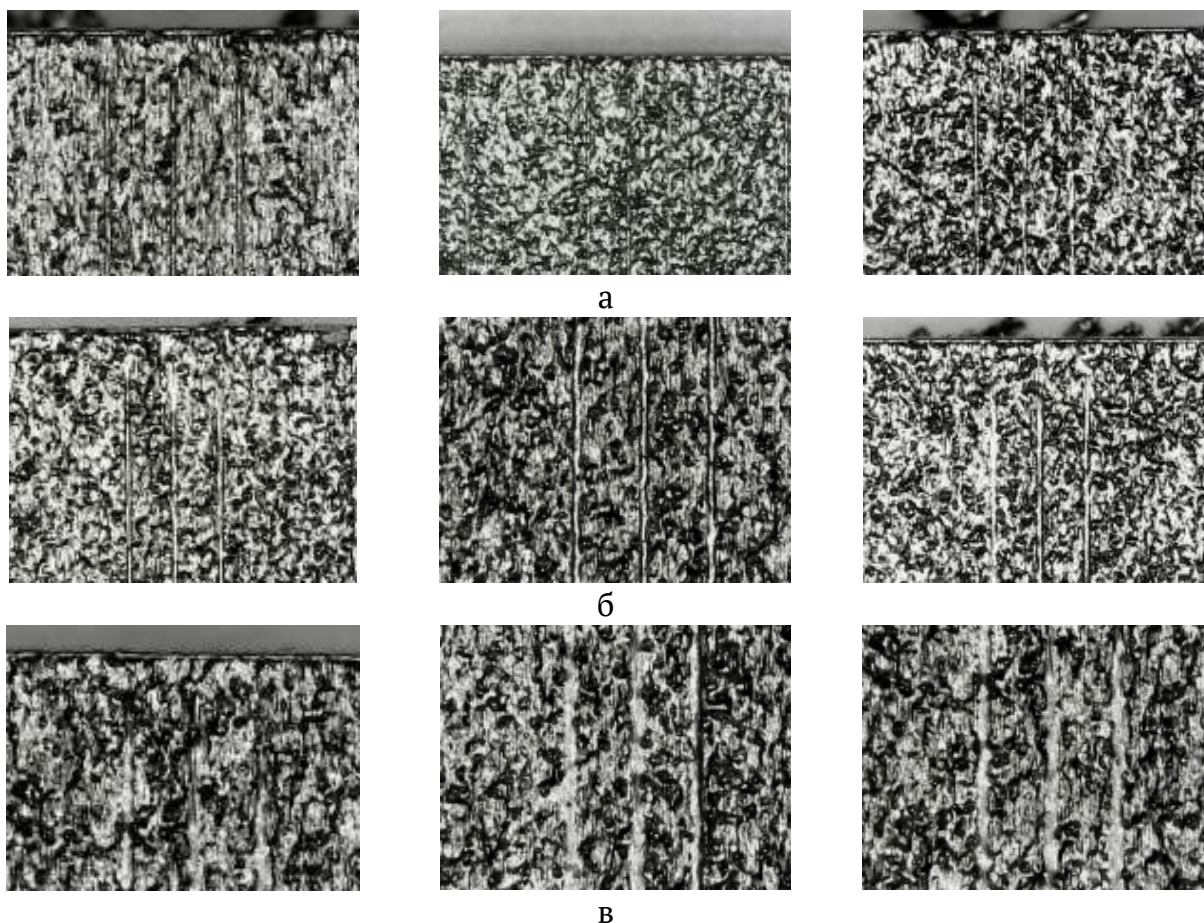


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд одиничного треку при різних комбінаціях параметрів: а – трек з дефектом каплеутворення, б – стабільний одиничний трек, в – переплавлення основного металу (розбризування треку)

За результатами досліджень було побудовано номограму параметрів друку одиничних треків з сплаву Inconel 718 (рис. 4). В результаті візуальної оцінки, встановлено область раціональних параметрів для друку деталей в області 37...41 Дж/мм³.

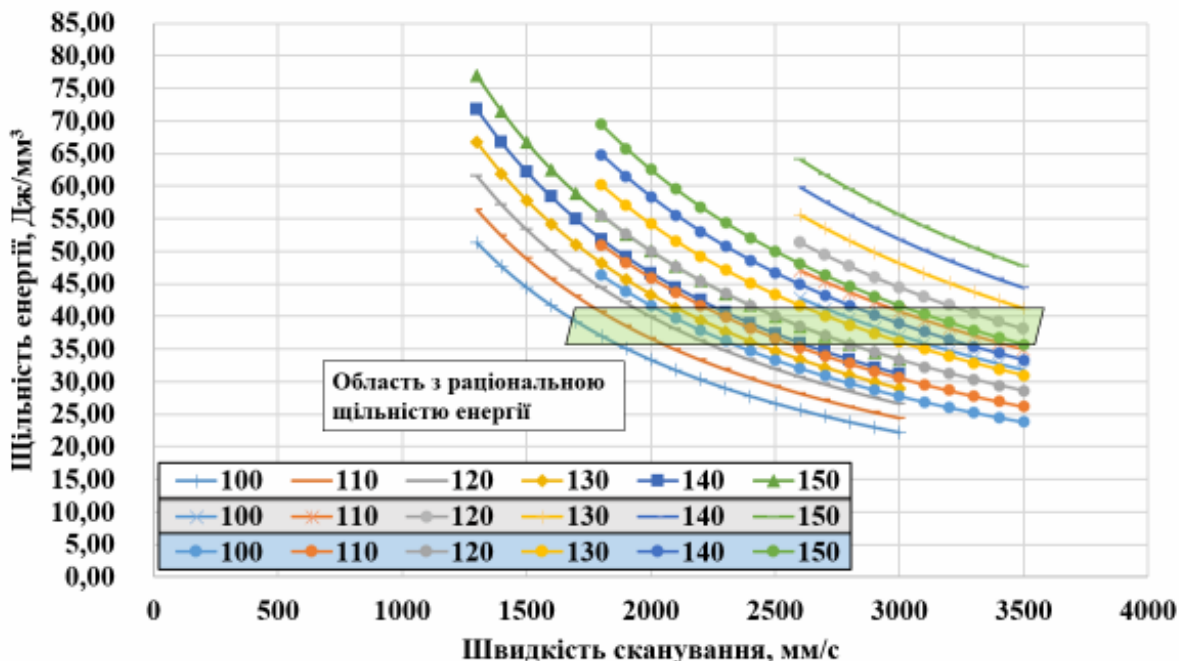


Рисунок 4 – Номограма з областю раціональних параметрів щільності енергії для побудови деталей за СЛП з Inconel 718 при 30 мкм

З аналізу зразків встановлено, що при потужностях 100...150 Вт та швидкостях сканування 1800...3400 мм/с формується стабільний трек, а при зменшенні швидкості відбувається розбризкування та переплавлення основного металу, (рис. 3, в). Слід зазначити, що при збільшенні швидкості сканування утворюється нестабільний трек, преривчастий, з краплеутворенням (рис. 3, а).

Висновки

1. Побудовано номограму параметрів друку одиничних треків з сплаву Inconel 718 при товщині шару 30 мкм.

2. З аналізу встановлено, що при потужностях 100...150 Вт та швидкостях сканування 1800...3400 мм/с формується стабільний трек, а при зменшенні швидкості утворюється розбризкування та переплавлення основного металу. Слід зазначити, що при збільшенні швидкості сканування утворюється нестабільний трек, преривчастий, з краплеутворенням.

3. Встановлено область раціональної щільності енергії 37...41 Дж/мм³ для побудови деталей з сплаву Inconel 718 при товщині шару 30 мкм.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kempen K., Thijs L., Yasa E. Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg. Solid Freeform Fabrication Symposium. 2011. 22. P. 484–495.
2. Kamath C., Eldasher B., Gallegos G.F. Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W. Int J Adv Manuf Technol. 2014. 74. P. 65–78.
3. Jia Q., Gu D. Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 super-alloy parts: densification, microstructure and properties. J Alloys Compd. 2014. 585. P.713–721.
4. Song B., Dong S., Liao H., Coddet C. Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering. Int J Adv Manuf Technol. 2012. 61. P. 967–974.
5. Gu H., Gong H., Pal D. Influences of energy density on porosity and microstructure of selective laser melted 17-4PH stainless steel. Solid Freeform Fabrication Symposium. 2013. P. 474-489.
6. Dilip J.J.S., Zhang S., Teng C. Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. Progress in Additive Manufacturing. 2017. 2. P.157–167.
7. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskyi, R., Badyuk, S. Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine. Kyiv, Naukova Dumka. 2022. 116p. DOI: 10.15407/978-966-00-1856-3
8. Adjamsky, S., Kononenko, G., & Podolskyi, R. Of plastic properties of AISI 316L steel by method of registration of macrolocalization fields. Міжнародна науково-технічна конференція Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні, (16-18 березня 2021, Дніпро), Дніпро, 2021, С. 4-8. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.001
9. Аджамский С. В., Кононенко А. А., Подольский Р. В. Симуляция влияния остаточных напряжений и параметров SLM-технологии на формирование области границ изделия из жаропрочного никелевого сплава INCONEL 718. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (17-19 марта 2020, Днепр), Днепр, 2020, С. 4–6. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2020.01.001.
10. Adjamskiy S.V., Kononenko G.A., Podolskyi R.V. Influence of SLM-process parameters on the formation of the boundaries of parts of heat-resistant nickel alloy INCONEL 718. Space Science and Technology. 2021. 27, 6. с. 105-114. DOI: 10.15407/knit2021.06.105
11. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskyi, R., Baduk, S. Studying the Influence of Orientation and Layer Thickness on the Physico-Mechanical Properties of Co-Cr-Mo

Alloy Manufactured by the SLM Method. Sci. innov., 18,5. 85–94.
DOI:10.15407/scine18.05.085

12. Adjamskiy S.V., Kononenko G.A., Podolskyi R.V. Influence of technological parameters of SLM-process on porosity of metal products. The paton welding journal. 2020. 10. p.13-19. DOI: 10.37434/tpwj2020.10.03

REFERENCES

1. Kempen K., Thijs L., Yasa E. (2011). Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg. Solid Freeform Fabrication Symposium. 22. P. 484–495.
2. Kamath C., Eldasher B., Gallegos G.F. (2014). Density of additively-manufactured, 316L SS parts using laser powder-bed fusion at powers up to 400 W. Int J Adv Manuf Technol. 74. P. 65–78.
3. Jia Q., Gu D. (2014). Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: densification, microstructure and properties. J Alloys Compd. 585. P.713–721.
4. Song B., Dong S., Liao H., Coddet C. (2012). Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering. Int J Adv Manuf Technol. 61. P. 967–974.
5. Gu H., Gong H., Pal D. (2013). Influences of energy density on porosity and microstructure of selective laser melted 17-4PH stainless steel. Solid Freeform Fabrication Symposium. P. 474-489.
6. Dilip J.J.S., Zhang S., Teng C. (2017). Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. Progress in Additive Manufacturing. 2. P.157–167.
7. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskyi, R., Badyuk, S. (2022). Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine. Kyiv, Naukova Dumka. 116p. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1856-3>
8. Adjamskiy, S., Kononenko, G., & Podolskyi, R. (2021). Of plastic properties of AISI 316L steel by method of registration of macrolocalization fields. Materiali mizhnarodnoi naukovo-tehnichnoi konferencii «Informacijni tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni», (16-18 bereznia 2021, Dnipro), Dnipro, S. 4-8. [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.001>
9. Adzhamskiy S. V., Kononenko A. A., Podol'skiy R. V. (2020). Simuljacija vlijanija ostatochnyh naprjazhenij i parametrov SLM-tehnologii na formirovanie oblasti granic izdelija iz zharoprochnogo nikelovogo splava inconel 718. Materiali mizhnarodnoi naukovo-tehnichnoi konferencii «Informacijni tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni» (17-19 marta 2020, Dnepr), Dnepr, S. 4–6 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2020.01.001>
10. Adjamskiy S.V., Kononenko G.A., Podolskyi R.V. Influence of SLM-process parameters on the formation of the boundaries of parts of heat-resistant nickel alloy

INCONEL 718. Space Science and Technology. 2021. 27, 6. с. 105-114. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.105>

11. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskyi, R., Baduk, S. Studying the Influence of Orientation and Layer Thickness on the Physico-Mechanical Properties of Co-Cr-Mo Alloy Manufactured by the SLM Method. Sci. innov., 18,5. 85—94. DOI:<https://doi.org/10.15407/scine18.05.085>

12. Adjamskiy S.V., Kononenko G.A., Podolskyi R.V. Influence of technological parameters of SLM-process on porosity of metal products. The paton welding journal. 2020. 10. p.13-19. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.10.03>

Received 01.03.2023.

Accepted 03.03.2023.

Justification of technological modes for the formation of a stable single track at a thickness of a 30- μ m layer of INCONEL 718 alloy

In selective laser melting (hereinafter - SLP), a single layer is created from a set of single tracks. The influence of the characteristics of the melt bath on the quality of construction of three-dimensional parts from various materials has been widely studied. Thus, finding the optimal scan speed is a trade-off between performance and quality of the build process. For certain printing factors (each material/equipment/part) it is necessary to find this optimum and this is one of the possible ways to improve the structure. The material used in this study was metal powder with a particle size of 10 to 45 μ m. Chemical composition of INCONEL 718 powder in % by mass: Cr=17.79; Ni=53.5; Mo=3.12; Mo = 3.01; Ti=0.85; Nb=5.12. In this work, single tracks were created on a base platform made of the same material. At the same time, the power was changed in the range of 100...150 W in steps of 10 W, and the speed - in the range of 1300...3500 mm/s in steps of 100 mm/s. A total of 108 printing modes of single tracks, located at a distance of 1.5...2 mm from each other, were investigated. The thickness of the layer used in the experiments is 30 μ m. A nomogram of printing parameters of single tracks made of INCONEL 718 alloy with a layer thickness of 30 microns was constructed. From the analysis of the nomogram, it was established that at the selected powers and scanning speeds of 1800...3400 mm/s, a stable track is formed, and when the speed is reduced, spattering and remelting of the base metal is formed. It should be noted that samples with an overlap of 0.05 and 0.06 form an unstable, discontinuous track with droplet formation when the scanning speed is increased. The range of rational energy density of 37...41 J/mm³ was established for the construction of parts from the Inconel 718 alloy with a layer thickness of 30 μ m.

Аджамський Сергій Вікторович – PhD, технічний директор LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», старший науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна.

Кононенко Анна Андріївна - докт. техн.наук, вчений секретар Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, інженер-матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Дніпро, Україна.

Подольський Ростислав Вячеславович – молодший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, інженер-матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», аспірант Українського державного університету науки і технологій, Дніпро, Україна.

Adjamskiy Sergey – PhD, Technical Director of Additive Laser Technology of Ukraine LLC, senior researcher at the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

Kononenko Ganna - Doct. technical science, scientific secretary of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

Podolskyi Rostislav - junior researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, PhD-student of the Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine.

**ВИКОРИСТАННЯ АРХІТЕКТУР ГЛИБОКИХ
ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ТА TENSORFLOW
У ЗАДАЧІ ВИЗНАЧЕННЯ БДЖІЛ НА ЗОБРАЖЕННІ**

Анотація. Бджоли є важливим елементом сільськогосподарської промисловості, але через зменшення їх популяції росте необхідність відстежування стану бджолиних сімей, наприклад, за допомогою фото- та відеоматеріалів. У цій публікації наведено аналіз ефективності роботи архітектур глибоких згорткових нейронних мереж та фреймворку Tensorflow на задачі визначення бджіл на фотографіях. Для дослідження було використано п'ять різних моделей з відкритого репозиторія TensorFlow 2 Detection Model Zoo, що були треновані на анованому вручну датасеті з фотографій бджіл. З тренованих моделей найкращий результат 80% визначення бджіл та їх частин показала архітектура SSD MobileNet.

Ключові слова: нейронні мережі, бджоли, глибоке навчання, технології комп'ютерного зору, tensorflow, згорткові нейронні мережі, ідентифікація комах, ідентифікація бджіл, виявлення об'єктів.

Постановка проблеми. Бджоли є важливими запилювачами різних видів рослин і відіграють важливу роль у підтримці біорізноманіття нашої планети, надаючи приблизно 14% запилювань у сільськогосподарському виробництві.[1] Але останніми роками популяція бджіл скорочується через різні фактори, зокрема через хвороби та паразитів.[2]

Через скорочення числа бджіл по всьому світу виникла потреба в моніторингу стану бджіл та бджолиних вуликів. Традиційні методи ідентифікації їх стану базуються на візуальному спостереженні бджолярем, що може зайняти багато часу, та такі потребують спеціалізованих знань від людини.

З розвитком глибокого навчання та технологій комп'ютерного зору, йде зростання інтересів до можливостей їх використання для автоматизації спостереження за складними біологічними системами, зокрема за бджолиними сім'ями.

Важливим плюсом використання нейронних мереж та технологій комп'ютерного зору є їх швидкість роботи та масштабованість. Системи, що використовують глибоке навчання, можуть бути точнішими у задачах підрахунку бджіл у вулику, а також їм не потрібна обов'язкова присутність людини для отримання результатів. На відміну від традиційних методів спостереження за бджолиними сім'ями, нейронні мережі можуть обробляти великі об'єми даних швидше та точніше, що робить їх потужним інструментом для дослідження життя бджолиних сімей у вуликах.

Ідентифікація бджіл на зображенні – це важливий перший крок, що дозволить використовувати результати для аналізу кількості бджіл та їх здоров'я на фото та відео.

Аналіз досліджень і публікацій. Як писалося вище, з ростом зацікавленості до застосування глибокого навчання та комп'ютерного зору, почали з'являтися дослідження на тему їх використання в області ідентифікації стану складних біологічних систем. Наприклад, були проведені дослідження ідентифікації метеликів[3], ос[4], павуків[5], та мух[6]. Також, були проведені дослідження використання цих технологій для контролю паразитів[7][8]. Всі ці дослідження успішно використали методи машинного навчання або комп'ютерного зору для ідентифікації об'єктів.

Схожі з поточною задачею ставились у статті з ідентифікації комах[9]. В ній автори теж використовували архітектури згорткових нейронних мереж, зокрема Faster R-CNN, SSD MobileNet та SSD Inception для ідентифікації та класифікації комах на фото.

Якщо розглядати використання нейронних мереж для визначення бджіл на зображенні, то існує дослідження[10], де згорткова нейронна мережа використовується у зв'язці з інфрачервоною камерою та роботом для визначення щільності бджіл на окремій зоні вулика.

Також якщо розглядати використання комп'ютерного зору для обчислення кількості бджіл, то автори цієї статті[11] за допомогою камери, мікрокомп'ютера Raspberry PI та бібліотеки OpenCV розробили систему для обчислення кількості бджіл на контрольованій ділянці зі статичним фоном поза вуликом.

З іншого боку, якщо розглядати безпосередньо дослідження що поєднують використання комп'ютерного зору та нейронних мереж для ідентифікації бджіл, то в цьому випадку [12] автори відстежували використання архітектури Faster R-CNN для визначення Мелопонінових бджіл на зображенні. В цьому до-

слідженні вони досягли результату точності визначення бджіл на зображенні у 74%.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є аналіз та визначення архітектури згорткової нейронної мережі, що найкраще підходить для задачі визначення бджіл на фотографіях.

Матеріали, методи та методики досліджень. У якості джерела даних для дослідження використовувалися фотографії, зроблені на камеру смартфона Samsung A20. Кожну фотографію розміром 4128x3096 пікселів без попередньої обробки було розділено на 9 рівних частин розміром 1376x1032 для полегшення процесу анотації та подальшої роботи з ними. Ці частини були використані для анотації вручну за допомогою програми Remo. Після процесу анотації було створено фінальний датасет шляхом вирізання анотованих зон з частин фотографій. Таким чином, кожне зображення містить окрему бджолу або її частину (якщо на фото була доступна тільки голова чи спина), у Таблиці 1 наведено приклади таких зображень.

Таблиця 1

Анотовані зображення бджіл



За підсумком, фінальний датасет містить 1246 анотованих зображень бджіл. З нього формуються дві вибірки: навчальна та тестова, що відповідно містять 1004 та 252 зображення.

Для навчання було обрано 5 моделей з відкритого репозиторія TensorFlow 2 Detection Model Zoo, детальна інформація про них міститься у Таблиці 2.

Для роботи з цими архітектурами, з датасету було згенеровано файл формату TFRecord, що далі буде використовуватися для їх навчання. Для порівняння результатів роботи вибраних архітектур згорткових нейронних мереж на задачі ідентифікації бджіл та подальшої побудови матриці невідповідностей використовуватимуться наступні метрики: істинно позитивні результати, хибно негативні, чутливість, та точність.

Інформаційний аналіз архітектур глибоких згорткових нейронних мереж

№	Архітектура	Стислий опис
1.	Faster R-CNN ResNet152 V1	Faster R-CNN ResNet152 – це архітектура глибокої згорткової нейронної мережі, що була створена для роботи з задачами по виявленню об'єктів. Вперше така архітектура була представлена у 2016 році як розширення існуючого фреймворку Faster R-CNN, що являє собою конвеєр, який складається з сітки запропонованих зон (region proposal network, RPN) та базованої на зонах згорткової нейронної мережі (region-based convolutional neural network, RCNN) Архітектура ResNet була представлена у 2015 році як вирішення проблеми зникання градієнта у дуже глибоких нейронних мережах. ResNet містить залишкові з'єднання, які забезпечують потік інформації через мережу, навіть коли мережа стає дуже глибокою. Ця архітектура досягла найкращих результатів на різних задачах з розпізнавання зображень, включаючи ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) 2015, де вона перевершила інші моделі та здобула перше місце у завданні виявлення об'єктів [13]. Успіх ResNet привів до її широкого використання у застосунках з комп'ютерного зору та стимулював подальше дослідження покращень архітектур глибоких нейронних мереж. У випадку Faster R-CNN ResNet152, ця архітектура містить 152 ResNet блоки.
2.	Faster R-CNN Inception ResNet V2	Faster R-CNN Inception ResNet V2 є глибокою нейронною мережею для виявлення об'єктів на зображеннях, яка поєднує в собі дві популярні архітектури – Faster R-CNN та Inception ResNet V2. Остання містить багато блоків, які називаються Inception ResNet блоками. Кожен блок містить різні типи згорток та пулінгів, що дозволяє збільшити кількість функцій, що можуть бути вивчені нейронною мережею. Крім того, блоки Inception ResNet містять також зворотні зв'язки, що допомагає запобігти проблемі зникаючого градієнта під час навчання глибоких нейронних мереж та покращити точність

		нейронної мережі [14].
3.	SSD MobileNet V2 FPNLite	Ця модель поєднує у собі дві архітектури – SSD та MobileNet. Основна ідея за архітектурою SSD полягає в тому, що мережа використовує лише один прохід по зображенню для виявлення об'єктів та їх класифікації, тобто вона не потребує попереднього відокремлення регіонів зображення, як у інших методах об'єктного виявлення, наприклад, R-CNN. Ключовою особливістю цієї архітектури є використання багатомасштабних виходів згорткових рамок, приєднаних до набору масивів ознак у верхній частині нейронної мережі. Такий спосіб дозволяє ефективно змоделювати можливі місця рамок [15]. MobileNet V2 – це нейронна мережа глибокого навчання, спроектована для роботи на мобільних пристроях та забезпечення високої точності класифікації зображень при мінімальних розмірі моделі та кількості операцій. Основна ідея MobileNet V2 полягає в розробці легкої та швидкої архітектури нейронної мережі за допомогою двох ключових технологій: residual connections та inverted residuals. Residual connections – це технологія, яка дозволяє передавати інформацію з попередніх шарів безпосередньо до наступних, що допомагає запобігти проблемі вивчення неглибоких функцій та забезпечити більш ефективне навчання нейронної мережі. Inverted residuals – це технологія, що дозволяє зменшити кількість параметрів мережі, зменшивши розмір шарів та застосовуючи їхнє збільшення з використанням 1x1 згорток та лінійних шарів [16].
4.	SSD ResNet50 V1 FPN	SSD ResNet50 – це глибока нейронна мережа, яка поєднує в собі дві архітектури: ResNet50 та Single Shot Detector (SSD). ResNet50 – це архітектура на базі ResNet з глибиною в 50 шарів, яка має високу точність класифікації зображень та виявлення об'єктів.
5.	CenterNet Resnet50 V2	CenterNet – це архітектура глибокої згорткової нейронної мережі, створена для задач з виявлення об'єктів. Це одноступінний детектор об'єктів, який використовує концепцію ключових точок та центроїдів для виявлення об'єктів. За-

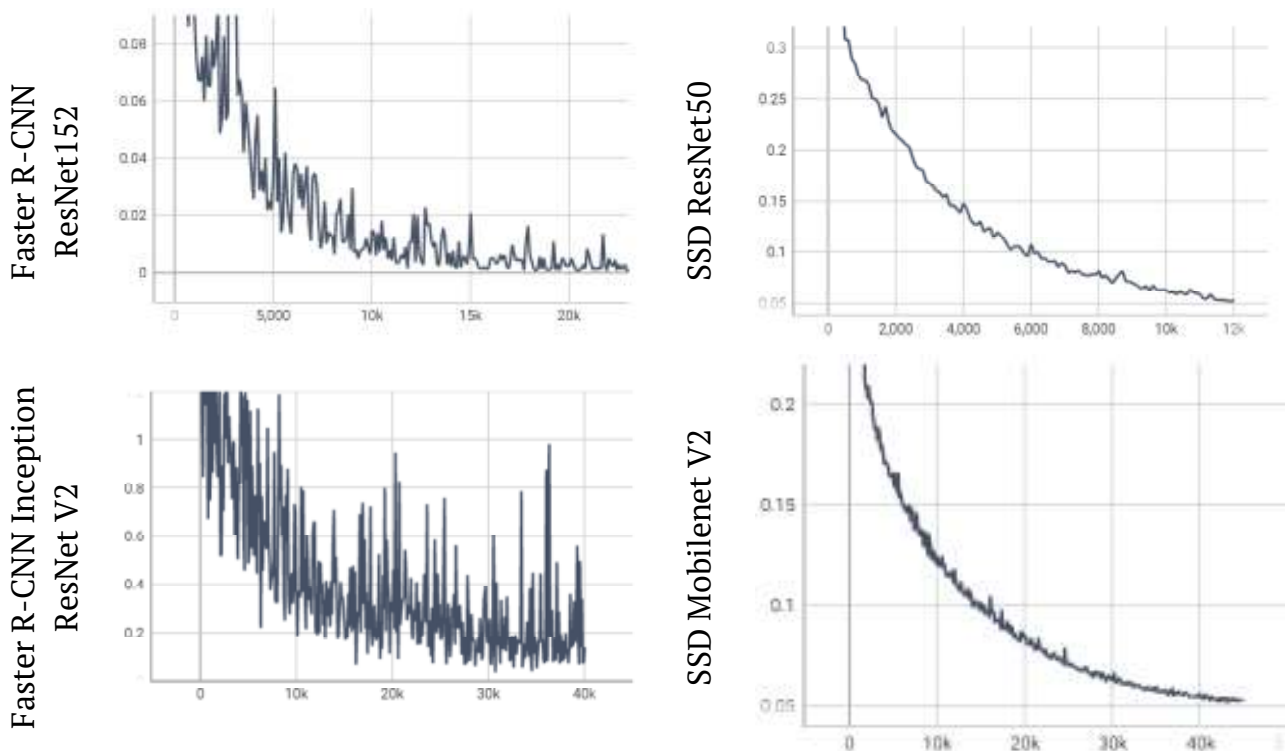
		мість того, щоб використовувати детектор областей для локалізації об'єкта, CenterNet Resnet50 V2 використовує центроїди, які визначають центральну точку об'єкта. Це дозволяє мережі більш точно та ефективно визначати розміри об'єкта та його позицію на зображенні [17].
--	--	---

Результати досліджень. Виконано порівняння метрик результатів роботи 5 різних архітектур глибоких згорткових нейронних мереж на задачі ідентифікації бджіл. Однією з основних метрик під час навчання нейронних мереж є значення функції втрат (Loss function). Функція втрат дозволяє виміряти відстані або різницю між прогнозованим виходом моделі та основною істиною навченої моделі.

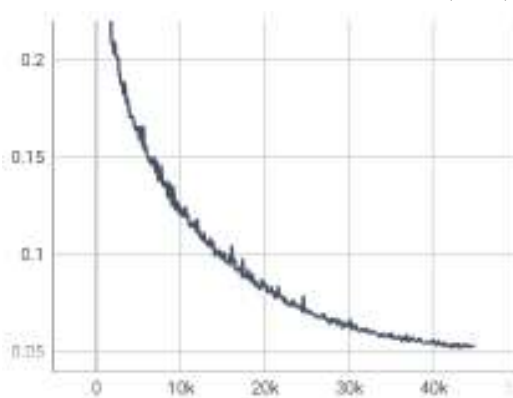
У таблиці 3 наведено прогрес навчання нейронних мереж та значення функції втрат на відповідних епохах.

Таблиця 3

Візуалізація значення функції втрат під час навчання
моделей нейронних мереж



CenterNet Resnet50 V1



Модель R-CNN ResNet152 V1 спочатку навчалася 45 000 епох, проте після 25 000 епохи модель не показувала зниження значення функції втрат. Щоб уникнути присутності фактору перетренування в результатах, далі використовуватиметься чек-поінт з епохи 25 000. Основні гіперпараметри, що використовувались для тренування моделей, значення функції втрат та витрачений на навчання час, наведені в таблиці 4.

Для тестування результатів навчання моделей було використано 28 фотографій груп бджіл на сотах, що не входили до складу початкового датасету. За попереднім підрахунком, загальна кількість бджіл на цих фотографіях дорівнює 775. Результати аналізу у вигляді матриці невідповідності наведені у таблиці 5.

Таблиця 4

Гіперпараметри та підсумкове значення функції втрат моделей

Архітектура	Розмір групи	Кількість епох	Функція втрат	Час тренування
Faster R-CNN ResNet152	8	25 000	0.0024	2 години
Faster R-CNN Inception ResNet V2	32	40 000	0.1367	2 години
SSD ResNet50	8	40 000	0.0533	6 годин 40 хвилин
SSD Mobilenet V2	64	45 000	0.0528	4 години 20 хвилин
CenterNet Resnet50 V1	48	35 000	0.1685	5 годин 07 хвилин

Матриця невідповідностей та середній час на аналіз тестових файлів

Архітектура	Істинно позитивних	Хибно негативних	Відсоток ідентифікованих	Точність	Середній час, мс
Faster R-CNN ResNet152	477	2	61.55	0.995	401
Faster R-CNN Inception ResNet V2	412	12	53.16	0.971	541
SSD ResNet50	474	4	61.16	0.991	695
SSD Mobilenet V2	620	27	80.00	0.958	675
CenterNet Resnet50 V1	532	5	68.64	0.990	662

Виходячи з наведених у матриці невідповідності результатів, SSD Mobilenet V2 показала найкращу продуктивність з результатом коректного визначення 80% бджіл, але також мало найгірший показник хибно негативних визначень, що у 2.7 разу вищий за середнє значення серед досліджених моделей. З наведених у таблиці 6 візуалізацій, ми можемо побачити, що такий поганий результат відбувся через те, що модель виділяла обмежувальною рамкою краї файлів, пусті місця, а також повторно відмічала ідентифікованих бджіл.

Також є сенс відмітити результати Faster R-CNN ResNet152 V1. Хоч ця модель і не знаходила дрібні частини бджіл і через це мала малий відсоток у підрахунку бджіл на фото, показала добрі результати у визначенні бджіл повністю.

Візуалізація тестових зображень з обмежувальними рамками

Архітектура	Зображення 1	Зображення 2	Зображення 3
Faster R-CNN ResNet152			
Faster R-CNN Inception ResNet V2			
SSD ResNet50			
SSD Mobilenet V2			
CenterNet Resnet50 V1			

Висновки. За результатами виконаних досліджень встановлено що мета-архітектура SSD MobileNet V2 показує найкращий результат у 80% у задачі ідентифікації бджіл на фотографії. Хоч Faster R-CNN ResNet152 показала найкращі результати у швидкості та точності ідентифікації бджіл на тестовій вибірці фо-

то, з її допомогою вдалось успішно визначити на 20% менше бджіл на фотографіях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Garibalidi L. Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance // Science. 2013., вип. 6127 Т. 339. С. 1608-1611
2. Worldwide occurrence records suggest a global decline in bee species richness // One Earth. 2021., вип. 1 Т. 4. С. 114-123.
3. The identification of butterfly families using content-based image retrieval // Biosystems Engineering. 2012., вип. 1 Т. 111. С. 24-32.
4. Weeks P.J.D., O'Neill M.A., Gaston K.J., Gauld I.D Species identification of wasps using principle component associative memories // Image and Vision Computing. 1999., вип. 12 Т. 17.
5. Ticay-rivas J., Marcos del Pozo-Banos, Eberhard W, Alonso J Spider specie identification and verification based on pattern recognition of it cobweb // Expert Systems with Applications. 2013., вип. 10 Т. 40. С. 4213-4225.
6. Automatic identification of fruit flies (Diptera: Tephritidae) / Faria F. та ін. // Journal of Visual Communication and Image Representation. 2014., вип. 7 Т. 25. С. 1516-1527.
7. Wen C., Guyer D. Image-based orchard insect automated identification and classification method // Computers and Electronics in Agriculture. 2012.№ 89. С. 110-115.
8. Wen C., Guyer D., Li W. Local feature-based identification and classification for orchard insects // Biosystems Engineering. 2009., вип. 3 Т. 104. С. 299-307.
9. Patel D., Bhatt N. Insect Identification Among Deep Learning's Meta-architectures Using TensorFlow // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019., вип. 1 Т. 9. С. 1910-1914.
10. Convolutional Neural Network for Honeybee Density Estimation / Luneckas T. та ін. // 2020 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). 2020. С. 2558-2566.
11. Automatic behaviour analysis system for honeybees using computer vision / Jun tu G. та ін. // Computers and Electronics in Agriculture. 2016.№ 112. С. 10-18.
12. Aziah A. , Nizam A. , Mohd-isa W. Image Segmentation of Meliponine Bee using Faster R-CNN // 2019 Third World Conference on Smart Trends in Systems Security and Sustainability (WorldS4). 2019., С. 235-238.
13. Deep Residual Learning for Image Recognition / He K. та ін. // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016., С. 770-778.
14. Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning / Szegedy C. та ін. // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2016., вип. 1 Т. 31. С. 1-12.

15. SSD: Single Shot MultiBox Detector / Liu W. та ін. // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV) (2016). 2016., С. 1-17.
16. MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks / Sandler M. та ін. // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2018., С. 4510-4520.
17. Zhou X., Wang D., Krähenbühl P. Objects as points //arXiv preprint arXiv:1904.07850. 2019. S. 1-12

REFERENCES

1. Garibalidi L. Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance // Science. 2013., vip. 6127 T. 339. S. 1608-1611.
2. Zattara E. Worldwide occurrence records suggest a global decline in bee species richness // One Earth. 2021., vip. 1 T. 4. S. 114-123.
3. Wang J. The identification of butterfly families using content-based image retrieval // Biosystems Engineering. 2012., vip. 1 T. 111. S. 24-32.
4. Weeks P.J.D., O'Neill M.A., Gaston K.J, Gauld I.D Species identification of wasps using principle component associative memories // Image and Vision Computing. 1999., vip. 12 T. 17. S. 861-866.
5. Ticay-rivas J., Marcos del Pozo-Banos, Eberhard W, Alonso J Spider specie identification and verification based on pattern recognition of it cobweb // Expert Systems with Applications. 2013., vip. 10 T. 40. S. 4213-4225.
6. Automatic identification of fruit flies (Diptera: Tephritidae) / Faria F. та ін. // Journal of Visual Communication and Image Representation. 2014., vip. 7 T. 25. S. 1516-1527.
7. Wen C. , Guyer D. Image-based orchard insect automated identification and classification method // Computers and Electronics in Agriculture. 2012.# 89. S. 110-115.
8. Wen C. , Guyer D. , Li W. Local feature-based identification and classification for orchard insects // Biosystems Engineering. 2009., vip. 3 T. 104. S. 299-307.
9. Patel D. , Bhatt N. Insect Identification Among Deep Learning's Meta-architectures Using TensorFlow // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019., vip. 1 T. 9. S. 1910-1914.
10. Convolutional Neural Network for Honeybee Density Estimation / Luneckas T. та ін. // 2020 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). 2020. S. 2558-2566.
11. Automatic behaviour analysis system for honeybees using computer vision / Jun tu G. та ін. // Computers and Electronics in Agriculture. 2016.# 112. S. 10-18.
12. Aziah A. , Nizam A. , Mohd-isa W. Image Segmentation of Meliponine Bee using Faster R-CNN // 2019 Third World Conference on Smart Trends in Systems Security and Sustainability (WorldS4). 2019., S. 235-238.

13. Deep Residual Learning for Image Recognition / He K. ta in. // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016., S. 770-778.
14. Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning / Szegedy C. ta in. // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2016., vip. 1 T. 31. S. 1-12.
15. SSD: Single Shot MultiBox Detector / Liu W. ta in. // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV) (2016). 2016., S. 1-17.
16. MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks / Sandler M. ta in. // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2018., S. 4510-4520.
17. Zhou X., Wang D., Krähenbühl P. Objects as points //arXiv preprint arXiv:1904.07850. 2019. S. 1-12

Received 01.03.2023.

Accepted 03.03.2023.

Using deep cnn architectures and tensorflow for bee identification on images

Problem statement. Bees are important pollinators for various plant species and are essential in maintaining our planet's biodiversity. With the decline in the number of bees worldwide, monitoring the bee hive state has become increasingly important. Purpose. Individual bee identification is an important task that, if performed well, will help to track the bee hive population and its health state in general. Related work. With the development of deep learning and computer vision technologies, several studies were done on their application in detecting insects like wasps, spiders, or fruit flies. Materials and methods. Photographs of bee hive frames with bees on them are being used as a data source for model training. These photographs were manually annotated using Remo annotation software. This study uses five widely used deep learning architectures (Faster R-CNN ResNet152, CenterNet ResNet50, SSD ResNet50, Faster R-CNN Inception ResNet V2, SSD MobileNet V2) for the purpose of bee detection on test images. These models were trained on the same dataset and evaluated on the same bee image set. Results and discussion. According to the confusion matrix, SSD MobileNet V2 architecture showed the best detection performance with 80% detected bees on test files, but it also had the falsest negative entries. On the other hand, Faster R-CNN ResNet152 model showed the best results in accuracy and evaluation speed, but successfully identified only 61% of the bees. Conclusions. The experiment showed that state-of-the-art CNN architecture SSD MobileNet V2 is a better performer with detecting 80% and 95% accuracy on bee images test set.

Жуков Олександр Олексійович – аспірант кафедри програмної інженерії математичного факультету Запорізького національного університету.

Горбенко Віталій Іванович – к.ф.м.н, доцент, доцент кафедри Програмної інженерії математичного факультету Запорізького національного університету.

Zhukov Oleksandr Oleksiiovych – postgraduate student of the department of program engineering, faculty of Mathematics, Zaporizhzhia National University, Ukraine.

Horbenko Vitalii Ivanovych - candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, associate professor department of program engineering, faculty of Mathematics, Zaporizhzhia National University, Ukraine.

І.О. Калініна, О.П. Гожий, О.П. Нечахін, С.І. Шиян

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРІВ НЕЛІНІЙНОЇ ПРОГНОЗНОЇ МОДЕЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

Анотація. В статті розглядається визначення та оцінка параметрів нелінійної регресійної моделі за допомогою генетичного алгоритму. Оцінка параметрів, є різновидом задачі оптимізації, що дає змогу її розв'язувати за допомогою стохастичних алгоритмів, це представляє можливість використання таких алгоритмів, щоб відповідати моделям нелінійної регресії. Було досліджено набір даних trees, який відображає нелінійну залежність між ознаками. В наборі міститься 1200 спостережень і три змінних: ID дерева; вік дерева; об'єм деревини. Була проаналізована залежність об'єму деревини (Vol) від віку дерева (Age). Увага на локації дерев дозволило підібрати логістичну функцію Річардса в якості функціональної залежності, нелінійною як за параметрами, так і за змінною. Для оцінки параметрів функції Річардса було використано генетичний алгоритм. Були обчислені коефіцієнти нелінійних моделей для випадково обраних локацій дерев. Для оцінки якості моделей використано коефіцієнт детермінації R².

Ключові слова: Генетичний алгоритм, метод найменших квадратів, нелінійна модель, функція Річардса, параметри моделі.

Вступ

Статистичне моделювання має важливе значення для підтримки фундаментальних і наукових гіпотез в теоретичних дослідженнях, а також процесів моделювання реальних процесів на практиці. Однією з головних проблем, яка виникає при побудові моделей є врахування нелінійностей, які притаманні процесу, який моделюється. Моделі з нелінійностями, або нелінійні моделі мають велику кількість прикладних застосувань у фізичних, біологічних та соціальних науках, бізнесі, інженерії, економіці та управлінні [1-3]. На сьогоднішній день визначена та успішно застосована велика кількість нелінійних моделей для вирішення різних завдань. Однак існує велика кількість ситуацій, які не можуть бути нелінійно змодельовані через те, що ситуації можуть бути складними або математично, чи статистично важкорозв'язуємі. Нелінійна поведінка деяких відносин ускладнює завдання мінімізації втрат конкретної моделі, яка

може бути додатково ускладнена математичними характеристиками прикладної моделі.

Однім із засобів подолання таких проблем є застосування нелінійних регресійних моделей. Нелінійна регресійна модель — це нелінійна функція з принаймні однією незалежною змінною та однією залежною змінною [2]. Основним завданням для побудови нелінійної регресійної моделі є визначення та оцінка параметрів. Оцінка параметрів, по суті, є типом задачі оптимізації, що дає змогу її розв'язувати за допомогою стохастичних алгоритмів, це представляє можливість використання таких алгоритмів, щоб відповідати моделям нелінійної регресії. Однак такі алгоритми мають обмеження щодо стабільності та стійкості їх результатів [1]. Прикладом є генетичний алгоритм (ГА).

Генетичні алгоритми є евристичними методами пошуку, які емулюють природну генетику та дарвінівські принципи еволюційного відбору [4]. Генетичні алгоритми використовують для вирішення широкого кола завдань, таких як дискретна оптимізація, багатокритерійна оптимізація, пошук і генерація нових рішень, а також для вирішення задач нелінійної оптимізації [5]. Він складається з набору потужних пошукових засобів евристики [6] і придатний для прогнозування нелінійних параметрів, завдяки своїй основній характеристиці отримання кількох рішень з кожною ітерацією [7]. Враховуючи це, та обмеження традиційних нелінійних алгоритмів оптимізації, таких як алгоритм Левенберга–Марквардта, коли початкові припущення параметрів мають бути визначеними та призводити до збіжності оцінок параметрів, метаевристики, то генетичний алгоритм може бути використано, для того щоб обрахувати параметри нелінійних моделей.

Постановка проблеми

Метою даної роботи є дослідження процесу визначення та оцінки параметрів нелінійних прогнозних моделей за допомогою генетичного алгоритму.

Аналіз останніх досліджень

Поряд із численними успішними застосуваннями в широкому ряді дисциплін [4-6], генетичні алгоритми були запропоновані для вирішення завдань регресійного аналізу. Відповідні дослідження можна розділити на три групи: ГА для оцінки параметрів регресійної моделі, ГА які ідентифікують регресійну модель для даної проблеми, і ГА які використовують як для оцінки, так і для ідентифікації регресійної моделі.

До першої групи можна віднести наступні наукові публікації. В роботі [5] оцінено параметри лінійної та двох нелінійних регресійних моделей за допо-

могою ГА. В роботі [8] використовують ГА для вирішення задачі ідентифікації параметрів лінійних і нелінійних цифрових фільтрів. Автори роботи [9] використовують нечіткий ГА для знаходження функціональних зв'язків між нечіткими змінними. В роботі [10] авторами було виконано аналіз трьох тестових завдань за допомогою генетичного алгоритму. Автори роботи [4] розробили ГА, стійкий до викидів, і перевірили його на п'яти тестових задачах. В роботі [6] використовується дві тестові задачі, які генетичний алгоритм може використовувати для оцінки параметрів. В [7] представлено застосування ГА для завдань, які включали задачі оцінки параметрів лінійної, множинної лінійної та логістичної регресії.

До другої групи відносяться наступні роботи. В [8] використовують генетичний алгоритм, як початкове значення методики оцінки параметрів регресійної моделі. В роботі [9] використовують підхід на основі генетичного алгоритму для методу пошуку найменшого абсолютного відхилення. В роботі [10] був представлений генетичний алгоритм для виявлення функціональної структури моделі, в якому за допомогою алгоритму Левенберга–Марквардта оцінюються параметри.

В третю групу входять роботи [11-13]. В роботі [14] вводять в нелінійну модель алгоритм ідентифікації на основі ГА для нелінійних раціональних моделей. В роботі представлено [15] ієрархічний підхід, який використовує генетичний алгоритм не тільки для того, щоб виявити функціональну структуру моделі, а й для оцінки параметрів моделі.

Результати дослідження та їх обговорення

Розглянемо використання нелінійного методу найменших квадратів (МНК), для знаходження коефіцієнтів регресійного рівняння за допомогою генетичного алгоритму на наборі даних *trees*, що належить до бібліотеки *sprRs*. У цьому наборі міститься 1200 спостережень і три змінних: ID дерева, який включає номер розташування, локації та номер дерева; вік дерева; об'єм деревини в куб. дм. Розглядається залежність об'єму деревини (*Vol*) від віку дерева (*Age*). Вигляд набору даних після завантаження представлено на рисунку 1.

```
Rows: 1,200  
Columns: 3  
$ ID <fct> 1.1.1, 1.1.1, 1.1.1, 1.1.1, 1.1.1, 1.1.1, 1.1.1, 1.1.1, 1.1.1, 1.1.1, 1.1.1, 1.1.  
1, 1.1.1, 1.1.2, 1.1.2, 1.1.2, 1.1.2, 1...  
$ Age <dbl> 9.67, 19.67, 29.67, 39.67, 49.67, 59.67, 69.67, 79.67, 89.67, 99.67, 109.67, 119.  
67, 129.67, 9.21, 19.21, 29.21, 39.21, ...  
$ Vol <dbl> 5.0, 38.0, 123.0, 263.0, 400.0, 555.0, 688.0, 820.0, 928.0, 1023.0, 1104.0, 1156.  
0, 1219.0, 6.0, 53.0, 152.0, 286.0, 465...
```

Рисунок 1 – Набір даних trees

Для аналізу характеру зав'язків аналізується графік залежності об'єму деревини (Vol) від віку дерева (Age) (рис. 2а).

При візуальному аналізі виявлено наявність додаткових ознак, які впливають на об'єм деревини. Для подальшої роботи обираються лише дані для дерев з певним місцем розташування, наприклад, ID = 1.3.11 (рис. 2б). В результаті вибірка має 12 спостережень та двома змінними (рис.3).

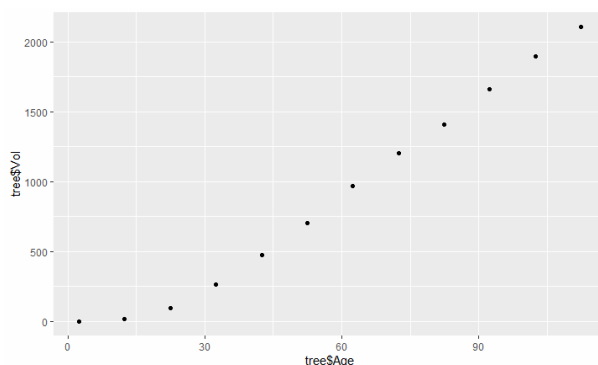
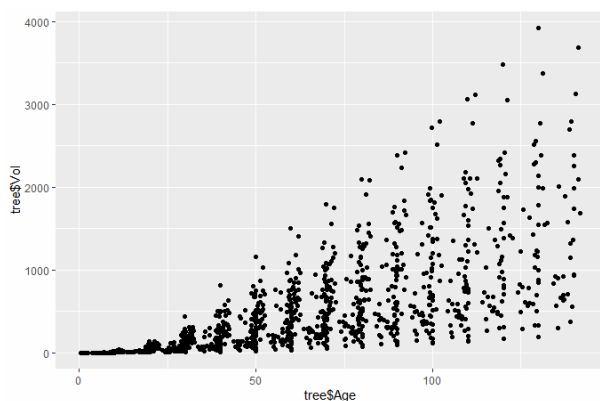


Рисунок 2 –Графіки залежності об'єму деревини (Vol) від віку дерева (Age)
а) для повного набору даних; б) для вибірки ID = 1.3.11

```
ROWS: 12
Columns: 2
$ Age <dbl> 2.44, 12.44, 22.44, 32.44, 42.44, 52.44, 62.44, 72.44, 82.44, 92.44~
$ Vol <dbl> 2.2, 20.0, 93.0, 262.0, 476.0, 705.0, 967.0, 1203.0, 1409.0, 1659.0~
```

Рисунок 3 – Вибірка з набору даних trees

Залежність об'єму деревини (y) від його віку дерева (x) описується за допомогою логістичної функції Річардса [5]:

$$y = a(1 - e^{-bx})^c.$$

Наступним кроком буде застосування методу найменших квадратів (МНК). Параметри якого входять в нелінійну модель:

$$a, b, c = \arg \min_{a, b, c} \sum_{i=1}^{12} \left(Vol_i - a(1 - e^{-bx})^c \right)^2.$$

Мінімізація суми квадратів помилок вирішується, за допомогою генетичного алгоритму. В середовищі програмування R генетичний алгоритм реалізується за допомогою функції ga, яка максимізує fitness-функцію. Вона задана заздалегідь.

Так як поставлено завдання мінімізації, то скористаємося наступним фактом:

$$\arg \min_{\Theta} (\Theta) = \arg \min_{\Theta} (-\Theta).$$

Для цього необхідно задати функцію Річардса. Вона буде використана для

fitness-функцію, яка вказана в аргументах функції *ga*. Задається функція *fit* суми квадратів помилок. Функція при роботі виводить в консоль значення *fit* на кожній ітерації алгоритму (рис. 4).

iter = 1		Mean = -71956884.8		Best = -643228.9
iter = 2		Mean = -63488550.80		Best = -60568.38
iter = 3		Mean = -54229145.71		Best = -16069.03
iter = 4		Mean = -49497174.27		Best = -16069.03
iter = 5		Mean = -42940214.660		Best = -4380.708
iter = 6		Mean = -38641933.25		Best = -4024.16
iter = 7		Mean = -30580733.91		Best = -4024.16
iter = 8		Mean = -23764633.39		Best = -4024.16
iter = 9		Mean = -15770500.00		Best = -4024.16
iter = 10		Mean = -11832425.11		Best = -4024.16

Рисунок 4 – Значення *fit* на кожній ітерації алгоритму

Результат роботи генетичного алгоритму залежить від того, яким чином налаштовані його параметри. При реалізації генетичного алгоритму були встановлені наступні параметри:

- *Popsizе*=500 – розмір популяції;
- *Maxiter*=5000 – максимальне число ітерацій, після якого робота генетичного алгоритму припиняється;
- *Run*=200 – число послідовних поколінь без будь-якого покращення в значенні *fitness*-функції перед зупиненням алгоритму.

Для операції селекції використана випадкова схема. При операції мутації виконується зміна випадково обраного біта. Вид операції кросоверу – одноточковий. Кросовер використовується для 80% хромосом кожного покоління.

Кінцевим результатом застосування генетичного алгоритму є підбір параметрів функції Річардса. На рисунку 5а представлено результат роботи генетичного алгоритму (підбор параметрів функції).

В результаті підбору параметрів отримано наступне рівняння регресії:

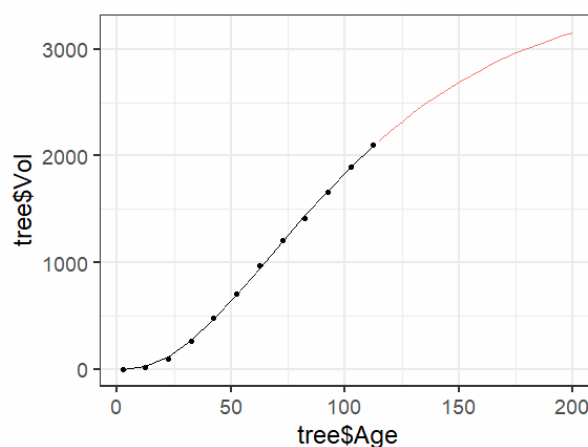
$$y = 3597.809(1 - e^{-b0.015x})^{2.780}.$$

Обчислене значення коефіцієнту детермінації $R^2 = 0.9996$ свідчить про високу якість моделі. На основі дослідженої моделі отримаємо прогноз об'єму деревини від віку дерева. Точковий графік вихідних даних, модельні значення по функції Річардса (гладка чорна лінія) та прогноз об'єму деревини від віку дерева до 200 років (гладка червона лінія) представлено на рисунку 5б.

-- Genetic Algorithm -----

GA settings:
 Type = real-valued
 Population size = 500
 Number of generations = 5000
 Elitism = 25
 Crossover probability = 0.8
 Mutation probability = 0.1
 Search domain =
 a b c
 lower 3000 0 2
 upper 4000 1 4

GA results:
 Iterations = 503
 Fitness function value = -2774.012
 Solution =
 a b c
 [1,] 3597.809 0.01541044 2.780185



а)

б)

Рисунок 5 – а) результати підбору параметрів функції;
 б) графік вихідних даних та отриманої функції Річардса
 з прогнозом об'єму деревини від віку дерева до 200 років

На рисунку 6 представлено зміни значень *fitness* - функції від числа ітерацій генетичного алгоритму.

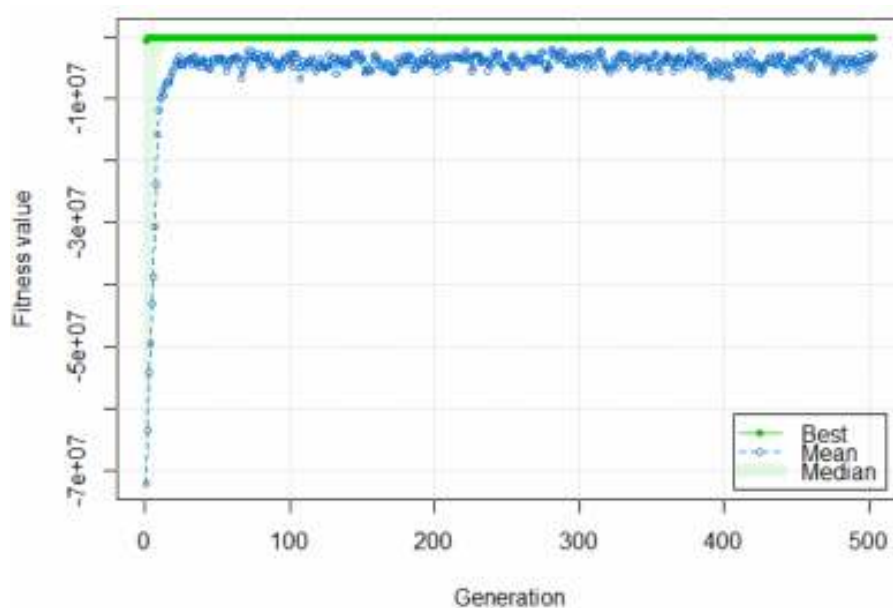


Рисунок 6 – Зміна значень *fitness*-функції від числа ітерацій

Таблиця 1

Параметри нелінійної функції Річардса для різних вибірок з набору даних

№	ID	n	a	b	c	R^2
1	1.3.11	12	3597,809	0,015	2,780	0,999
2	2.4.7	13	3999,838	0,014	3,367	0,995
3	1.1.3	14	4000,000	0,013	2,624	0,998
4	5.7.21	13	3000,418	0,002	2,000	0,993
5	3.1.12	14	3346,793	0,010	2,822	0,999
6	5.4.10	13	3001,146	0,010	3,226	0,999
7	4.7.15	11	3999,981	0,007	2,837	0,992
8	4.5.37	12	3000,001	0,005	2,192	0,999
Весь набір даних		1200	3999,999	0,007	2,078	0,497

Для аналізу змін параметрів нелінійної функції береться випадково різні вибірки даних із генеральної сукупності за допомогою ознаки ID. Параметри нелінійної функції Річардса представлено в таблиці 1. Для оцінки точності моделі в таблиці 1 також представлено відповідні значення коефіцієнту детермінації R^2 .

Висновки

В роботі представлено дослідження пошуку параметрів нелінійної регресії за допомогою генетичного алгоритму. Було досліджено набір даних «trees», що відображає складний нелінійний процес. Для аналізу змін параметрів нелінійної функції, були використані випадкові вибірки даних із генеральної сукупності. Головна увага в наборі даних була сфокусована на локації дерев. Це дозволило підібрати логістичну функцію Річардса в якості функціональної залежності. Вона є нелінійною як за параметрами, так і за змінною. Для оцінки параметрів функції Річардса було використано генетичний алгоритм. Високе значення коефіцієнту детермінації R^2 підтвердило якість моделей на всіх досліджуваних вибірках з набору даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бідюк П.І., Гожий О.П. Ймовірно-статистичні методи моделювання і прогнозування: [монографія] . – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2014. – 440 с.

2. De Gooijer J.G. Elements of Nonlinear Time Series Analysis and Forecasting. Springer Series in Statistics. Library of Congress Control Number: 2017935720. 2017, 620 p. DOI 10.1007/978-3-319-43252-6/
3. Bidyuk P., Gozhyj A., Kalinina I., Vysotska V. (2020) Methods for Forecasting Nonlinear Non-stationary Processes in Machine Learning. Communications in Computer and Information Science. – Volume 1158. – Springer, Cham, 2020. – pp. 470-485. – Print ISBN978-3-030-61655-7, Online ISBN978-3-030-61656-4. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-61656-4_32.
4. Gen M., Cheng R. (2000), Genetic Algorithms and Engineering Optimization (New York: John Wiley & Sons Inc).
5. Kapanoglu M., Koc I.O., Erdogmus S., Genetic algorithms in parameter estimation for nonlinear regression models: an experimental approach, Journal of Statistical Computation and Simulation, 77(10):851-867, (2007).
6. Haj Seyed Hadi M.R., Gonzalez-Andujar J.L. Comparison of Fitting Weed Seedling Emergence Models with Nonlinear Regression and Genetic Algorithm. Comput. Electron. Agric. 2009, 65, pp. 19–25.
7. Mitra S., Mitra A., Kundu D. Genetic algorithm and M-estimator based robust sequential estimation of parameters of nonlinear sinusoidal signals. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. Vol. 16, Issue 7, 2011, pp. 2796-2809. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2010.10.005>.
8. Paterakis E., Petridis V., Kehagias A. Genetic algorithm in parameter estimation of nonlinear dynamic systems. International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, 2006, 171 Accesses, 2 Citations, pp. 1008–1017. DOI: 10.1007/BFb0056942.
9. Monti C.A.U., Oliveira R.M., Roise J.P., Scolforo H.F., Gomide L.R. Hybrid Method for Fitting Nonlinear Height–Diameter Functions. Journals “Forests”, Vol. 13, Issue 11, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13111783>.
10. Lechter, Y., Sethares, W.A. Nonlinear Parameter Estimation via the Genetic Algorithm. IEEE Trans. Signal Process. 1994, 42, pp. 927–935.
11. Chatterjee, S., Laudato M., Lynch, L.A. Genetic Algorithms and Their Statistical Applications: An Introduction. Comput. Stat. Data Anal. 1996, 22, pp. 633–651.
12. Jin Y.-F., Yin Z.-Y., Shen S.-L., Hicher, P.-Y. Selection of Sand Models and Identification of Parameters Using an Enhanced Genetic Algorithm. Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. 2016, 40, pp. 1219–1240.
13. VanderNoot T.J. Abrahams I. The Use of Genetic Algorithms in the Non-Linear Regression of Immittance Data. J. Electroanal. Chem. 1998, 448, pp. 17–23.

14. Lacerda T.H.S., Miranda E.N., E Lopes I.L., Fonseca G.R., França L.C., de Jesus França L.C., Gomide L.R. Feature Selection by Genetic Algorithm in Nonlinear Taper Model. Can. J. For. Res. 2022, 52, pp. 769–779.

15. Zhou X., Wang J., (2005) A genetic method of LAD estimation for models with censored data. Computational Statistics and Data Analysis, 48(3), pp. 451–466.

Received 01.03.2023.

Accepted 03.03.2023.

***Synthesis of the parameters of a nonlinear predictive model
using a genetic algorithm***

The article deals with the definition and estimation of the parameters of a nonlinear regression model using a genetic algorithm. Parameter estimation is a type of optimization problem that can be solved using stochastic algorithms, which presents the possibility of using such algorithms to fit nonlinear regression models. The trees data set, which displays the non-linear relationship between traits, was investigated. The nonlinear method of least squares (NLS) was used to find the coefficients of the regression equation using a genetic algorithm on the trees data set belonging to the spuRs library. The set contains 1200 observations and three variables: tree ID; age of the tree; volume of wood. Visual analysis revealed the presence of additional signs that affect the volume of wood. Only data for trees with a certain location are selected for further work. As a result, the sample has 12 observations and two variables. The dependence of the volume of wood (Vol) on the age of the tree (Age) was analyzed. Attention to tree locations made it possible to choose the Richards logistic function as a functional dependence, nonlinear both in terms of parameters and variables. A genetic algorithm was used to estimate the parameters of the Richards function. The result of the work of the genetic algorithm depends on how its parameters are configured. When implementing the genetic algorithm, the following parameters were set: population size; the maximum number of iterations after which the work of the genetic algorithm stops; the number of consecutive generations without any improvement in the value of the fitness function before stopping the algorithm. A random scheme was used for the selection operation. A mutation operation involves changing a randomly selected bit. The type of crossover operation is one-point. Coefficients of nonlinear models were calculated for randomly selected tree locations. The coefficient of determination R^2 was used to assess the quality of the models.

Калініна Ірина Олександрівна – доцент кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, к.т.н., доцент

Гожий Олександр Петрович – професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили, д.т.н., професор

Нечахін Владіслав Володимирович – аспірант кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили.

Шиян Сергій Іванович – аспірант кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили.

Kalinina Iryna Oleksandrivna - Associate Professor of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petra Mohyly, Ph.D., associate professor

Gozhyj Oleksandr Petrovych - professor of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petra Mohyly, Doc.of Ing.Sc., professor

Nechahin Vladislav Volodymyrovych - PhD student of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petra Mohyly.

Shiyan Serhii Ivanovych – PhD student of the Department of Intellectual Information Systems of the Black Sea National University named after Petera Mohyly.

М.І. Твердоступ

ОСОБЛИВІСТЬ РІШЕННЯ ЗАДАЧ МІНІМІЗАЦІЇ БУЛЕВИХ ФУНКЦІЙ

Анотація. Пошук мінімальної форми булевої функції є обов'язковим для побудови логічної схеми цифрового автомату, який проектується. На прикладах мінімізації булевої функції, заданої аналітичним виразом та координатним способом у вигляді діаграми Вейча, підтверджено, що рішенням задачі мінімізації є знаходження не одного випадкового зображення, а множини всіх можливих зображень для забезпечення в подальшому можливості вибору оптимального рішення при побудові цифрового автомату.

Ключові слова: алгоритм Квайна, булева функція, діаграма Вейча, диз'юнкція, конституента одиниці, кон'юнкція, логічна схема, мінімізація, проста імпліканта.

Постановка проблеми. Вивчення студентами дисципліни «Комп'ютерна логіка» передбачає опанування методами мінімізації булевих функцій для побудови найбільш оптимальних логічних схем цифрових автоматів.

Відомо, що довільна булева функція може мати безліч еквівалентних форм[1, 2], тільки досконала диз'юнктивна (або кон'юнктивна) нормальна форма має одне зображення. Результатом мінімізації, взагалі, може бути не одне, а декілька рівнозначних зображень булевої функції з найменшою кількістю змінних і логічних операцій з ними. Проте, можливу множину зображень мінімальної форми булевої функції не завжди враховують при вирішенні задач мінімізації. Досить часто результатом мінімізації приводять тільки одне зображення, вважаючи при цьому, що задача вирішена остаточно. Таке рішення є далеко неповним, воно в подальшому не дає можливості для вибору оптимальної логічної схеми створюваного цифрового автомату[3].

Мета дослідження. Метою роботи є обґрунтування необхідності пошуку всіх можливих зображень мінімальної форми булевої функції для забезпечення можливості вибору оптимального рішення.

Основна частина. Поставлене завдання вирішимо шляхом аналізу мінімізації деякої довільної булевої функції f , яка має, наприклад, вигляд

$$f = \overline{y}(x\overline{z} + z)xy, \quad (1)$$

Канонічна форма початкової функції (1) може бути представлена як диз'юнктивна нормальна форма у вигляді

$$f = \bar{x}y\bar{z} + \bar{y}z\ xy. \quad (2)$$

Проведемо мінімізацію булевої функції (1) аналітичним способом за відомим алгоритмом Квайна[2]. Цей алгоритм вимагає обов'язкової наявності досконалої диз'юнктивної нормальної форми булевої функції, яку треба мінімізувати. Для цього елементарні кон'юнкції зображення (2) перетворимо в конституенти одиниці шляхом доповнення відсутніми аргументами x та z (для другої та третьої кон'юнкцій відповідно), опираючись на такі перетворення

$$\bar{y}z = \bar{y}z(x + \bar{x}) = x\bar{y}z + \bar{x}\bar{y}z, \quad (3)$$

$$xy = xy(z + \bar{z}) = xyz + xy\bar{z}. \quad (4)$$

З урахуванням (2), (3) та (4) запишемо зображення початкової функції (1) у вигляді досконалої диз'юнктивної нормальної форми

$$f = \bar{x}\bar{y}\bar{z} + \bar{x}\bar{y}z + x\bar{y}z + xy\bar{z} + xyz. \quad (5)$$

До (5) застосуємо операцію неповного диз'юнктивного склеювання відповідних конституент, а саме: першої з другою, другої з третьою, третьої з п'ятою, четвертої з п'ятою. Склеювання дає можливість знайти прості імпліканти $\bar{x}\bar{y}$, $\bar{y}z$, xz і xy , які використаємо для створення скороченої диз'юнктивної нормальної форми заданої булевої функції (1)

$$f = \bar{x}\bar{y} + \bar{y}z + xz + xy. \quad (6)$$

Будуємо імплікантну таблицю Квайна із конституент одиниці і простих імплікант.

Таблиця 1

Імплікантна таблиця до мінімізації функції f

№	Прості імпліканти	Конституенти одиниці функції f				
		xyz	$x\bar{y}z$	$\bar{x}y\bar{z}$	$\bar{x}\bar{y}z$	$xy\bar{z}$
1	xz					
2	xy					
3	$\bar{y}z$					
4	$\bar{x}\bar{y}$					

Із таблиці 1 видно, що прості імпліканти за номерами два і чотири є ядром, бо тільки вони покривають четверту і п'яту конституенти, отже, імпліканти за номерами два і чотири будуть обов'язково входити до складу мінімальної функції. Ці імпліканти також покривають першу і третю конституенти. Для по-

криття константи за номером два можна обрати першу імпліканту. Видно, що набір імплікант за номерами 1, 2 і 4 покриває всі константи одиниці функції f , представленою у вигляді зображення досконалої диз'юнктивної нормальної форми (5). Цей набір імплікант об'єднуємо операцією диз'юнкції і, в результаті, отримуємо зображення мінімальної (також і тупикової) диз'юнктивної нормальної форми булевої функції f , заданої у вигляді зображенням (1)

$$f = xy + \bar{x}\bar{y} + xz . \quad (7)$$

Саме на цьому місці, досить часто, вважають, що задача вже вирішена, бо дійсно знайдена мінімальна форма (7) заданої булевої функції (1). Проте, із подальшого розгляду імплікантної таблиці випливає, що для покриття константи за номером два можна замість імплікант за номером два обрати також просту імпліканту за номером три, що відповідно дає зображення іще однієї мінімальної форми булевої функції f

$$f = xy + \bar{x}\bar{y} + \bar{y}z . \quad (8)$$

Отже, повним рішенням задачі мінімізації, в цьому випадку, є зображення (7) і (8), саме вони складають множину рівноправних зображень булевої функції, яка в подальшому може бути використана для забезпечення можливості вибору при конструюванні цифрового автомату.

Проведемо мінімізацію булевої функції (1), представленої не аналітичним способом, а іншим, наприклад, координатним у вигляді діаграми Вейча [2], наведеної на рис. 1. В таблиці константи одиниці функції f розташовані в клітинах з координатами, які відповідають саме тим наборам аргументів і їх значень, кон'юнкція яких дорівнює одиниці. Виконаємо операцію склеювання сусідніх наборів, які відрізняються значеннями тільки одного аргумента конституент. Один із можливих варіантів склеювання конституент показано на рис.1 тонкими лініями овалів, а саме: константи першої і другої клітин верхнього рядка склеюємо за змінною z , що формує просту імпліканту xy ; конституенту в другій клітині верхнього рядка склеюємо з конституентою другої клітини нижнього рядка за змінною y , це дає імпліканту xz ; в нижньому рядку склеюємо константи в третій і четвертій клітинах за змінною z і отримуємо імпліканту $\bar{x}\bar{y}$. Імпліканти xy , $\bar{x}\bar{y}$ і xz об'єднуємо операцією диз'юнкції і отримуємо зображення мінімальної форми початкової функції у вигляді

$$f = xy + \bar{x}\bar{y} + xz . \quad (9)$$

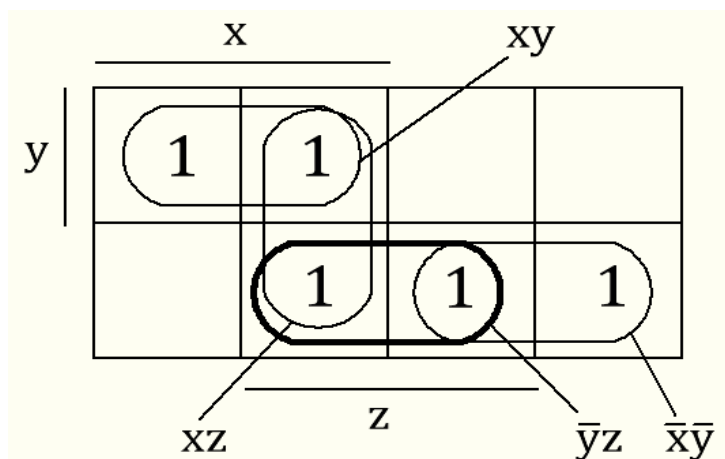


Рисунок 1 – Мінімізація булевої функції f заданої у вигляді діаграми Вейча

Другий варіант (наведено потовщеною лінією) склеювання конститuent другої і третьої клітин нижнього рядка за змінною $\bar{x}$ дає можливість отримати просту імпліканту $\bar{y}z$ замість xz і сформуванати іще одне зображення мінімальної форми початкової функції f у вигляді

$$f = xy + \bar{x}\bar{y} + \bar{y}z. \quad (10)$$

Отримуємо набір рівноправних зображень (9) і (10), який є повним рішенням задачі мінімізації з використанням координатного методу. Набір (9), (10) повністю співпадає з набором зображень (7), (8), раніше отриманих аналітичним способом, що свідчить про правильність рішення задачі мінімізації, метою якої є знаходження множини зображень булевої функції для забезпечення можливості вибору.

В навчальному процесі при опануванні студентами методів мінімізації неврахування наявності множини зображень може привести до спотворення оцінки якості відповіді. Особливо це актуально на вступних іспитах в магістратуру, де, досить часто, перевірка екзаменаційних робіт проводиться порівнянням відповіді абітурієнта з відповіддю із заздалегідь приготовленого переліку, який, на жаль, містить тільки одне зображення булевої функції, що також приводить до спотворення оцінки роботи.

Висновок. Підтверджено, що коректним рішенням задачі мінімізації булевої функції є обов'язкове зображення не однієї можливої функції, а множини зображень всіх можливих мінімальних форм булевої функції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кочубей О. О., Сопільник О. В. Прикладна теорія цифрових автоматів. Логічні основи. Д.: РВВ ДНУ; Вид-во ДНУ, 2009. – 264 с.
2. Прикладная теория цифровых автоматов / Самофалов К. Г. и др. К. : Вища шк. Головное изд-во, 1987. 375 с.
3. Твердоступ М. Про коректність рішення задач мінімізації булевих функцій при вивченні дисципліни «Комп'ютерна логіка». Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2022). Тези доп. на VII Всеукр. наук.-практ. конф.: 23-25 листопада 2022 р., м. Дніпро/Дніпро: ДНУ, 2022. С. 85 – 86.

REFERENCES

1. Kochubey O. O., Sopilnyk O. V. Applied theory of digital automata. Logical foundations. D.: RVV DNU; DNU Publishing House, 2009. - 264 p.
2. Applied theory of digital automata / Samofalov K. G. et al. K.: Vishcha school. Head publishing house, 1987. - 375 p.
3. Tverdostup M. On the correctness of solving problems of minimization of Boolean functions when studying the discipline "Computer logic". Promising directions of modern electronics, information and computer systems (MEICS-2022). Theses add. on VII All-Ukrainian science and practice conference: November 23-25, 2022, Dnipro/ Dnipro: DNU, 2022. P. 85 - 86.

Received 01.03.2023.

Accepted 03.03.2023.

A peculiarity of solving problems of minimization of Boolean functions

Minimization of Boolean functions is mandatory for the construction of logic circuits of digital automata. The result of minimization, in general, can be not one, but several equivalent images of the Boolean function with the smallest number of variables and logical operations with them. However, a possible set of images of the minimal form of a Boolean function is not always taken into account when solving minimization problems. Quite often, the result of minimization results in only one image, while considering that the problem is finally solved. Of course, such a solution is far from complete, it does not provide an opportunity to choose the optimal logic scheme of the digital automaton to be created. The purpose of the work is to justify the need to find all possible representations of the minimal form of the Boolean function. The task was solved by analyzing the minimization of an arbitrary Boolean function. The minimization was carried out analytically according to the Quine algorithm and coordinate using the Veitch diagram. In both cases, matching sets of images of the minimal form of the

Boolean function are obtained, regardless of the chosen method of minimization. This testifies to the correctness of the solution to the minimization problem, the purpose of which is to find a set of images of the Boolean function to ensure the possibility of choosing the optimal solution when constructing a logic circuit of a digital automaton. It has been confirmed that the correct solution to the minimization problem is a mandatory image of not one possible function, but a set of images of all possible minimal forms of the Boolean function.

Використанням методів мінімізації за алгоритмами Квайна та діаграм Вейча підтверджена обов'язкова необхідність знаходження множини зображень мінімальної форми булевої функції для забезпечення можливості вибору оптимальної логічної схеми проектованого цифрового автомату.

Твердоступ Микола Іванович – доцент, к.т.н., доцент кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету ім.Олеся Гончара.

Tverdostup Mykola Ivanovych – Associate Professor of Computer Systems Engineering Department of the Oles Honchar Dnipro National University.

В.Є. Білозьоров, В.Г. Зайцев, О.В. Погорелов, О.Л. Хижа

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ НЕЛІНІЙНОГО РЕКУРЕНТНОГО АНАЛІЗУ ДО ТИПІЗАЦІЇ ДАНИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ ЕЛЕКТРОЕНЦЕФАЛОГРАФІЇ

Анотація. У статті розглядається питання використання методу нелінійного рекурентного аналізу до проблеми типізації інформації, що надана у вигляді даних часових рядів електроенцефалограм знятих з пацієнту. Описано методика визначення схованої інформації для цього ряду та її використання для побудови відповідної рекурентної діаграми (recurrence plots, RP) у точки сьому інформації. Показано, що використання RP має суттєві недоліки, які пов'язані з візуалізацією інформації на екрані монітору комп'ютера, тому запропоновано наступний крок дослідження - обрахування чисельних показників RP. Їх обрахування потрібно здійснити для кожної точки сьому інформації, в якості яких було запропоновано узяти точки (O_1 , O_2 , Pz) - це праве та ліве потиличне та тім'яне відведення. Для отримання чисельних значень показників RP пропонується використовувати середовище Матлаб та розроблений для цього пакет crptools. Наведені обраховані показники RP дозволили здійснити типізацію отриманих даних та визначити тип якій отримав назву «HEALTHY-RP», що відрізняє епілептичні та неепілептичні типи ЕЕГ.

Ключові слова: рекурентний аналіз, електроенцефалографія, часовий ряд, рекурентна діаграма, параметр затримки, розмірність простору вкладення, JRQA аналіз, середовище Матлаб.

Вступ і мета. На сучасному етапі аналіз реальних даних часових рядів різноманітних процесів набув широкого поширення. Методи нелінійної динаміки було успішно продемонстровано на всіляких відомих модельних процесах. Зазначимо роботи [1, 2], які дослідили як різноманітні модельні завдання, так і реальні процеси, наприклад, вивчення даних електроенцефалографії (ЕЕГ) [3-5, 6]. Однак у зазначених роботах йшлося про спроби реконструкції систем звичайних диференційних рівнянь (ЗДР) на основі інформації даних часових рядів ЕЕГ. Потім з'явилися роботи [3, 5, 6] зі спробою використання нових підходів для завдань, пов'язаних з класифікацією

інформації даних електрокардіографії (ЕКГ) та ЕЕГ. Проблема є складною, але це викликало інше бачення її розв'язання.

Мета даної роботи - запропонувати підхід реалізації пошуку параметрів типізації нейрофізіологічних паттернів або патологій головного мозку на основі даних ЕЕГ за допомогою чисельних показників нелінійного рекурентного аналізу.

Огляд проблеми та її аналіз. Головна проблема аналізу часового ряду полягає в тому, що для побудови рекурентної діаграми (RP) необхідно досить точно визначити приховані параметри m і τ . m - це розмірність простору вклядення часового ряду, для якого виконується аналіз, а τ - параметр його затримки. До визначення даних параметрів деякі дослідники [3, 5-6] поставилися суто формально, що є помилковим з точки зору синергетики, а тим більше нелінійної динаміки. Це питання пов'язане з правильною побудовою RP, тому що далі, на її основі, будується той чи інший алгоритм або підхід до вирішення проблеми класифікації. Якщо на даному етапі зробити помилку, то навіть штучний інтелект (ШІ) у вигляді нейронної мережі навряд чи потім зможе допомогти. Підтвердження цьому можна знайти у роботах одного з авторів рекурентного аналізу Н. Марвана [4]. На даний час розроблено та реалізовано багато алгоритмів, що дозволяють визначити зазначені параметри.

У роботах [3, 5] для обраних сигналів ЕЕГ побудова рекурентної діаграми та її подальший аналіз проводився за допомогою нейронної мережі. Наведені в роботі значення параметрів m і τ викликає питання, на які поки що відповіді немає. У роботі [6] для сигналу ЕКГ теж будувалася RP, обробка якої проводилася графічними методами. Значення цих параметрів теж не наводиться. Стверджується, що отримані результати є задовільними. Тим не менш, і цей, і інші підходи мають право на життя.

Проте отримані спеціалістами в галузі прикладної математики результати не є зрозумілими для невропатологів [7]. Вони вже мають графіки сигналів, отримані шляхом ЕЕГ, з якими звикли працювати та їх аналізувати. Ми ж намагаємося запропонувати інші види візуалізації отриманої ними інформації: рекурентні діаграми, аттрактори тощо. Інформація в такому вигляді їх, мабуть, теж не влаштує. Тому має сенс спрямувати зусилля на більш детальне дослідження параметрів m і τ , а також чисельних показників RP. Можливо, саме тут і ховається сутність проблеми.

Для підтвердження або спростування цього твердження виконано аналіз інформації з бази даних ЕЕГ, наданих кафедрою неврології Дніпровського Медичного Університету.

У роботі використовувалося програмне забезпечення, розроблене і реалізоване у середовищі типу Матлаб (Октавіа) – `srptool` [8] під ОС Windows.

Опис наданих даних ЕЕГ. Для дослідження тимчасових рядів з ЕЕГ методами нелінійного рекурентного аналізу була використана унікальна база реальних даних. Вона включала інформацію 7 пацієнтів:

Пацієнт 1. 47 років, діагноз епілепсія, ЕЕГ знято - 03.06.2016, 28.11.2016, 02.10.2017, 11.03.2019, 09.06.2020.

Пацієнт 2. 34 роки, ВСД, ЕЕГ знято - 02.06.2003, 04.03.2004, 15.11.2014, 03.07.2018, 23.06.2020.

Пацієнт 3. 70 років, діагноз епілепсія, ЕЕГ знято - 01.06.2017, 10.06.2020.

Пацієнт 4. 76 років, діагноз епілепсія, ЕЕГ знято - 12.12.2018, 10.06.2020.

Пацієнт 5. 60 років, діагноз епілепсія, ЕЕГ знято - 21.09.2015, 23.06.2020.

Пацієнт 6. 45 років, діагноз судорожні після оперативного видалення пухлини, ЕЕГ знято - 28.07.2014, 31.07.2015, 26.07.2016, 22.07.2019, 20.07.2020.

Пацієнт 7. 23 роки, діагноз здоровий, ЕЕГ знято - 02.02.2021.

Для зняття інформації ЕЕГ використовувався стандартний пристрій НЕЙРОКОМ (MedicXAI 21- каналний) з робочою частотою 250 Гц.

Проблеми пошуку параметрів. Відомо, що однією із задач аналізу даних є задача класифікації типів або типізації інформації. Це дозволяє розбити множину об'єктів на створені типи, на основі аналізу отриманих чисельних показників ЕЕГ, що дозволяє прискорити процес подальшої обробки даних. При типізації кожен об'єкт спостереження відноситься до певного типу на основі деякої якісної властивості або сукупності властивостей показників ЕЕГ.

Задачам класифікації присвячено багато робіт. До числа поширених методів розв'язання задач класифікації відносяться: нейронні мережі; логістична і пробіт-регресія; дерева рішень; метод найближчого сусіда; машини опорних векторів; дискримінантний аналіз [9-10].

Традиційні підходи, засновані на математичній статистики або імітаційному моделюванні не дозволяють будувати адекватні моделі в умовах обмеженості часових, обчислювальних і матеріальних ресурсів. Тому при розв'язанні багатьох практичних задач, пов'язаних з класифікацією об'єктів, широко застосовуються моделі і методи штучного інтелекту з використанням технологій інтелектуального аналізу даних [11].

Перед нами була поставлена задача: по-перше, визначити з реальних даних ЕЕГ інформацію, за використанням якої можливо провести аналіз деяких показників, що більш формально та стисло характеризують опис патології досліджуваного пацієнта; по-друге – провести аналіз знайдених показників, визначити модель щодо пошуку тих з них, які можливо визначають ту або іншу типізацію.

Як вже вказано вище, в якості математичного апарату використовувався нелінійний рекурентний аналіз. Його застосування для побудови рекурентних діаграм різних модельних та реальних процесів у даний час є досить цікавим і сучасним [12]. Але його використання потребує для реальних даних точного знання двох схованих параметрів: параметра затримки та значення розмірності простору вкладення [4]. В результаті розв'язанні цієї проблеми була запропонована наступна методика обробки реальної інформації ЕЕГ кожного пацієнта, яка складалася з наступних кроків:

1. Надання графіку оброблюваного сигналу у точках (O_1 , O_2 , P_z) - це праве та ліве потиличне та тім'яне відведення.
2. Обрахування значень параметра затримки τ (до трьох значень).
3. Визначення значення розмірності простору вкладення m (для $\min$ та $\max$ -норми) з урахуванням вже визначених у пункті 2 значень параметра затримки τ .
4. Побудова RP діаграми для визначених параметрів τ та m . Значення ϵ обирається не більше 10-20%.
5. Розрахунок для визначених значень τ та m чисельних показників RP діаграми - JRQA аналіз.
6. Отримати усі значення чисельних показників RP діаграми, визначити шляхи типізації наданих даних.

Необхідно вказати, що масштабування екрану монітора не дає змоги побачити дуже чітко RP діаграми. Вказана проблема має місце і при вираженні її малюнку RP на листі формату A4.

Визначення чисельних показників RP діаграми. Графік рекурентності - це графік, що являє собою двійкову симетричну квадратну матрицю, в якій стовпці та рядки становлять час виникнення стану. У матриці значення кожного елемента відповідає певній парі разів, щоб вказати, чи повторюються стану, тобто значення 1 означає, що стан повторюється, тоді як значення 0 означає зворотне. З іншого боку, графік повторення є матрицею $N \times N$, що складається тільки з чорних і білих точок з характеристиками, які чорна точка зображує по-

вторення, поряд з двома осями часу. Графік повторюваності виражається наступним математичним рівнянням:

$$R_{i,j} = \theta(\varepsilon_1 - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), \quad \vec{x}_j \in \mathbb{R}^m \quad i, j = 1, \dots, N$$

де розглядаються стани $\mathbf{x}_i$ мають кількість N ; ε_1 - порогове значення відстані (околиця); $\|\cdot\|$ - норма; $\theta(\cdot)$ – функція Хевісайду. Коли відстань між двома станами, тобто $\mathbf{x}_i$ та $\mathbf{x}_j$, менша за порогове значення ε , визначається повторення.

Для показників, які використовуємо, представимо їх визначення, що на дано у рекурентному аналізі. Для обчислення мір, які використовуються у RP, значення порога ε є фіксованими.

Міра рекурентності (recurrence rate, RR)

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon}$$

показує щільність рекурентних точок, просто підраховуючи їх. N - кількість точок на траєкторії у фазовому просторі. Дана міра показує можливість знаходження рекурентної точки в RP (ймовірність повторення стану).

Наступна міра розглядає діагональні лінії. Частотний розподіл довжин l діагональних ліній в RP $P^\varepsilon(l) = \{l_i; i = 1, \dots, N_l\}$, де N_l - абсолютна кількість діагональних ліній (кожна лінія надається тільки один раз). Процеси зі стохастичною поведінкою можуть породжувати дуже короткі діагоналі чи взагалі не породжувати їх, тоді як детерміністські процеси дають довгі діагоналі і малу кількість окремих рекурентних точок.

Отже, відношення рекурентних точок

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N l P^\varepsilon(l)}{\sum_{l,j=1}^N R_{l,j}^{m,\varepsilon}},$$

називається *мірою детермінізму (determinism, DET)* або передбачуваності системи. Слід зазначити, що цей захід не має значення реального детермінізму процесу. Порогове значення l_{min} виключає діагональні лінії, утворені тангенціальним рухом траєкторії у фазовому просторі. Якщо $l_{min} = 1$, $DET=RR$. Більше значення детермінізму вказує більш діагональну лінію в RP і, отже, більш сильну передбачуваність системи.

Діагональні структури показують час, протягом якого ділянка траєкторії підходить досить близько до іншої ділянки траєкторії. Таким чином, ці лінії дозволяють судити про розбіжність елементів траєкторій.

Середня довжина діагональних ліній

$$L = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N l P^{\varepsilon}(l)}{\sum_{l=l_{min}}^N P^{\varepsilon}(l)},$$

це середній час, протягом якого дві ділянки траєкторії проходять близько одна до одної, і може розглядатися як середній час передбачуваності. Чим більше значення L , тим менша випадковість, тобто легше визначити поведінку ознаки системи.

Міра ентропії (entropy, ENTR) співвідноситься з ентропією Шеннона (Shannon) частотного розподілу довжин діагональних ліній

$$ENTR = - \sum_{l=l_{min}}^N p(l) \ln p(l), \quad p(l) = \frac{P^{\varepsilon}(l)}{\sum_{l=l_{min}}^N P^{\varepsilon}(l)},$$

та відображає складність детерміністської складової у системі. Велике значення ентропії має на увазі періодичність системи, а низьке - хаотичність. Інакше кажучи, велика ентропія слідує за складнішою системою.

Міра завмирання (laminarity, LAM)

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N v P^{\varepsilon}(v)}{\sum_{l,j=1}^N R_{l,j}^{m,\varepsilon}},$$

визначається відношенням кількості рекурентних точок, що утворюють вертикальні лінії, до загальної кількості рекурентних точок. LAM характеризує наявність станів завмирання системи (тобто коли рух системи фазової траєкторії зупиняється або просувається дуже повільно). Ламінарність обчислює ймовірність того, що стан залишиться для наступного тимчасового кроку.

Середня довжина вертикальних структур

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N v P^{\varepsilon}(v)}{\sum_{l,j=1}^N P^{\varepsilon}(v)},$$

називається *мірою часу зупинки (trapping time, TT)* і характеризує середній час, який система може провести у певному стані або тривалість часу, протягом якого кожен стан перебуває у пастці.

Розрахунок даних хворого пацієнта. Як вже вказано в методиці, розрахунки велися для точок O_1 , O_2 та P_z .

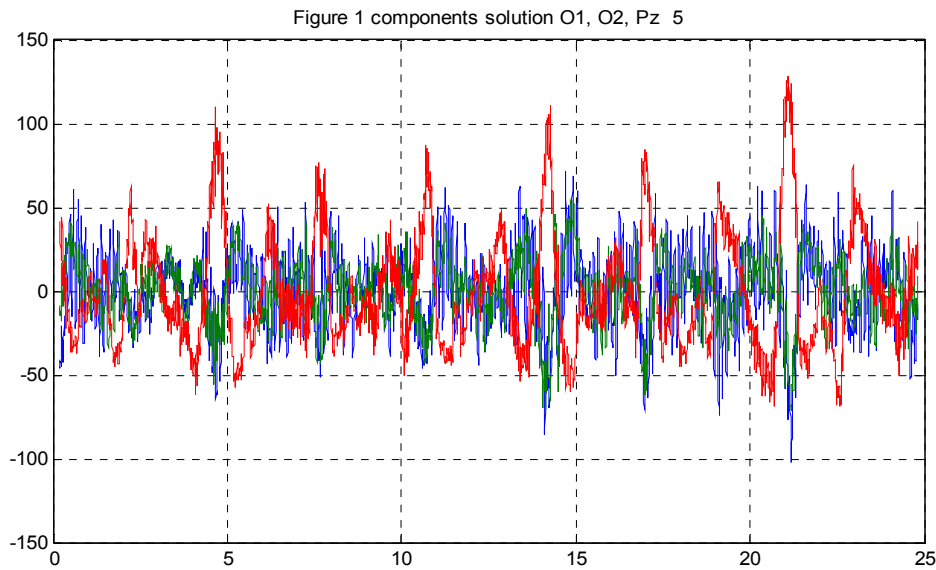


Рисунок 1 - Траєкторія поведінки сигналів у т. O_1 (синя), O_2 (зелена), P_z (червона)

1) Розрахунки для точки O_1 .

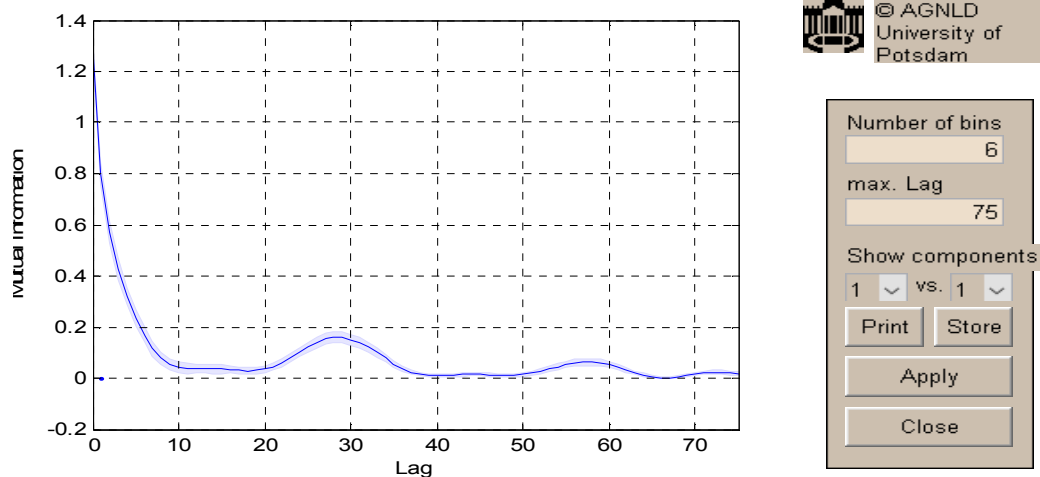


Рисунок 2 - Визначення параметра затримки τ для точки O_1
(значення 17, 40, 66)

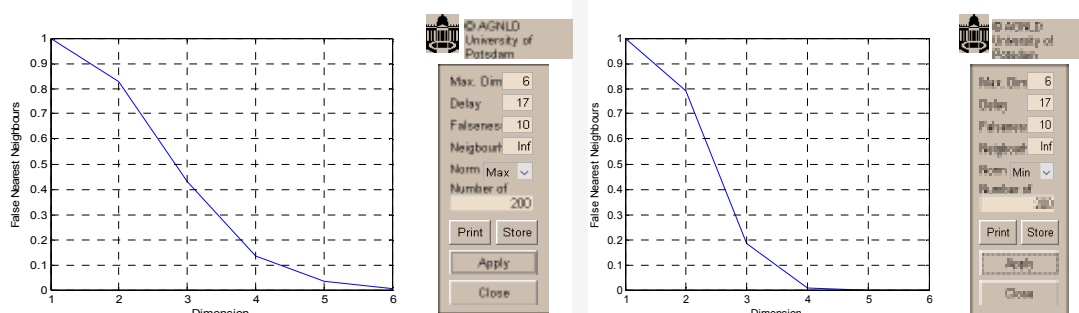


Рисунок 3 - Обрахування m для точки O_1 , $\tau=17$ (перше значення ціле нижче 0.1)
 $m=5$ зліва та $m=4$ справа (надано для обох норм)

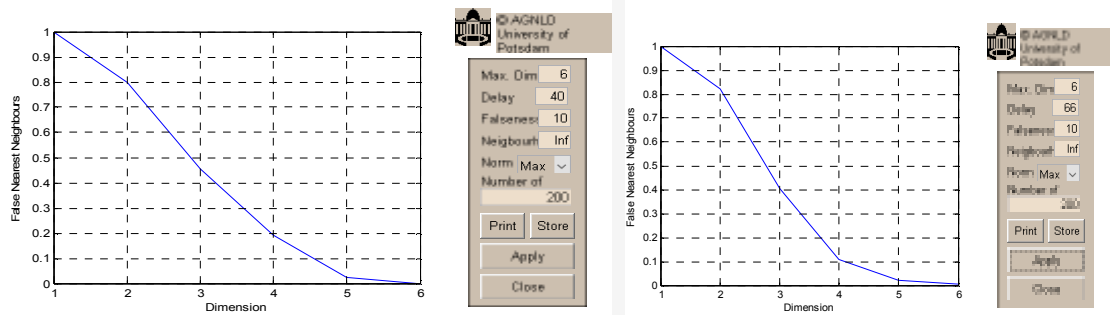


Рисунок 4 - Обрахування m для точки O_1 , $\tau=40$ (зліва), 66 (справа) $m=5$ зліва та $m=5$ справа (надано для норми max)

Результати щодо норми **min** такі, як на рис.3 для норми **min** $m=4$.

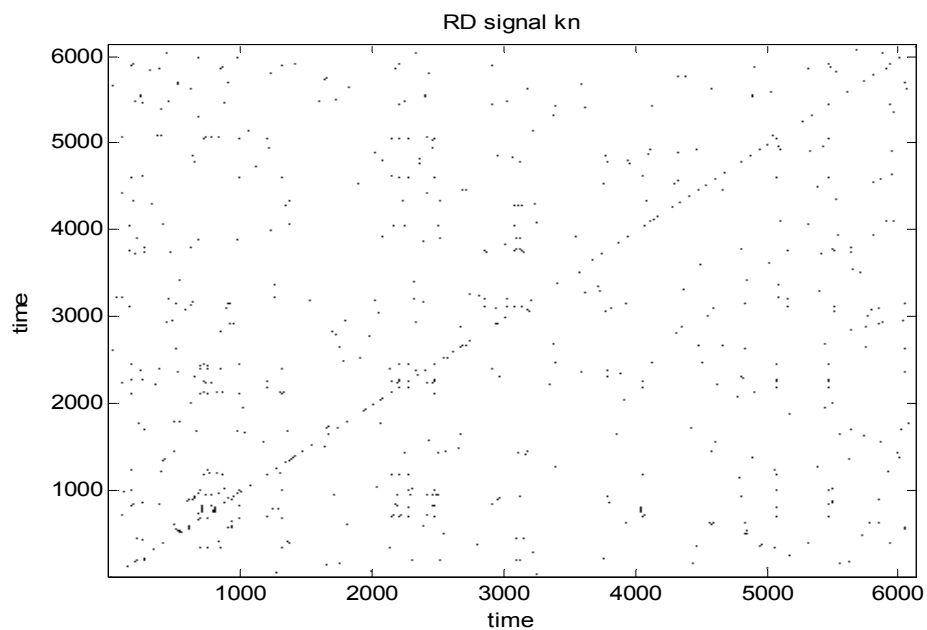


Рисунок 5 - Рекурентна діаграма сигналу O_1 ($m=4$, $\tau=17$, $\varepsilon = 0.1$)

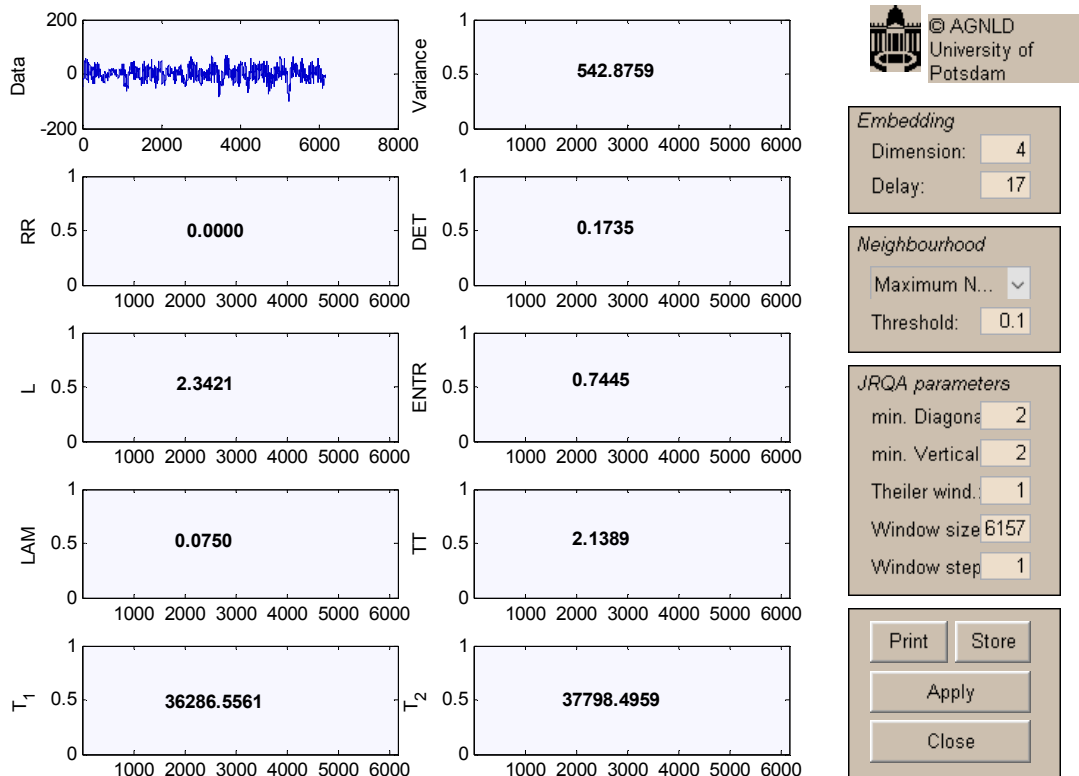


Рисунок 6 - Обрахунок JRQA параметрів для точки O_1 ($m=4$, $\tau=17$, $\varepsilon = 0.1$)

2) Для точки O_2 значення параметра затримки τ аналогічно рис.2. було визначено та мало наступні значення: $\tau=15, 41, 68$.

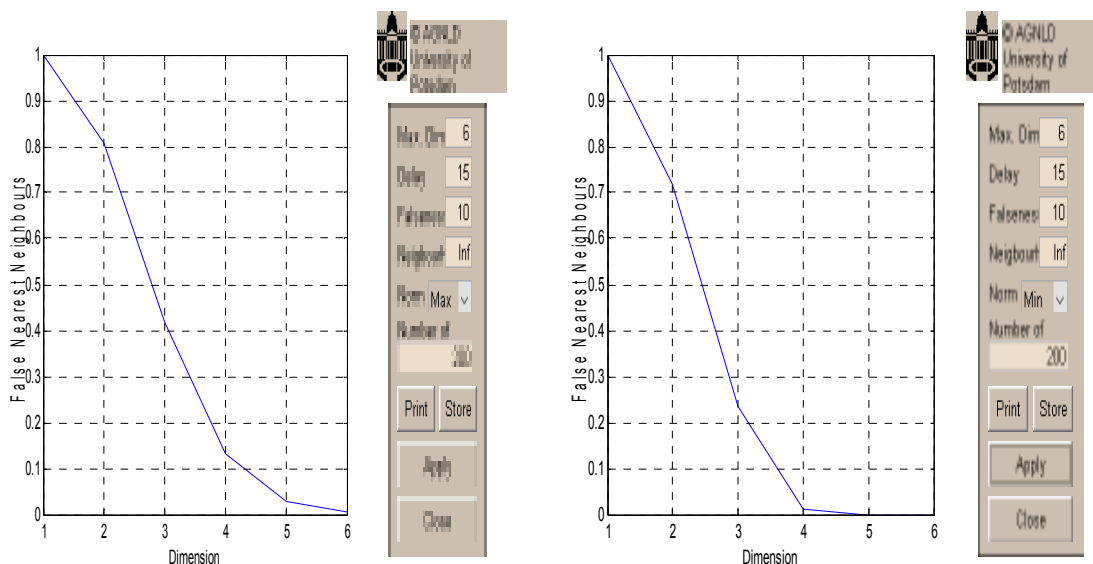


Рисунок 7 - Обрахування m для точки O_2 , $\tau=15$ (перше значення ціле нижче 0.1)
 $m=5$ зліва та $m=4$ справа (надано для обох норм)

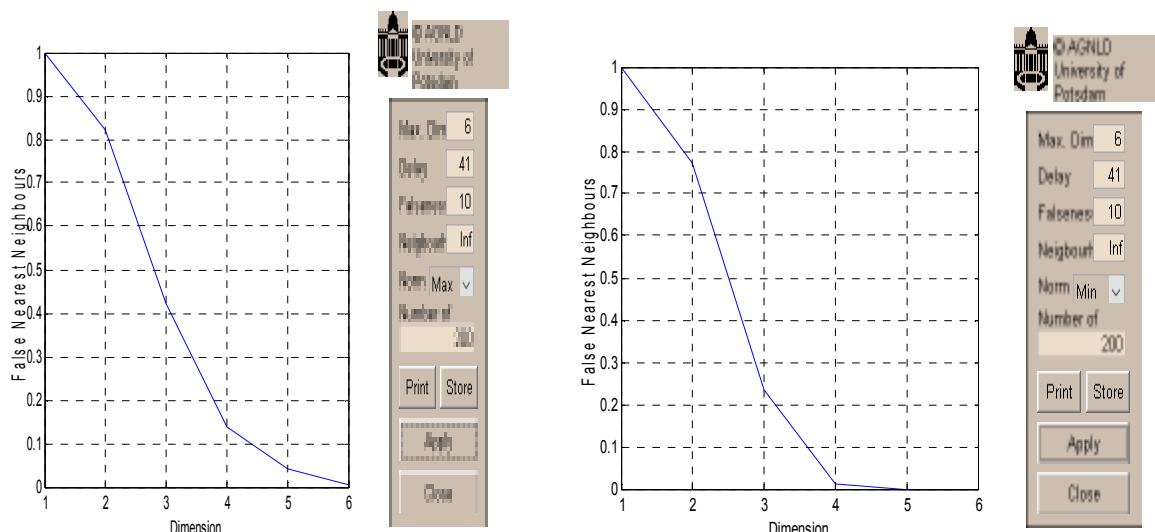


Рисунок 8 - Обрахування m для точки O_2 , $\tau = 41$ (перше значення ціле нижче 0.1)
 $m = 5$ зліва та $m = 4$ справа (надано для обох норм)

Результати щодо точки O_2 для $\tau = 66$, $m = 5$ для max норми та $m = 4$ для min норми. Такім чином вони аналогічні для усіх значень параметру затримки.

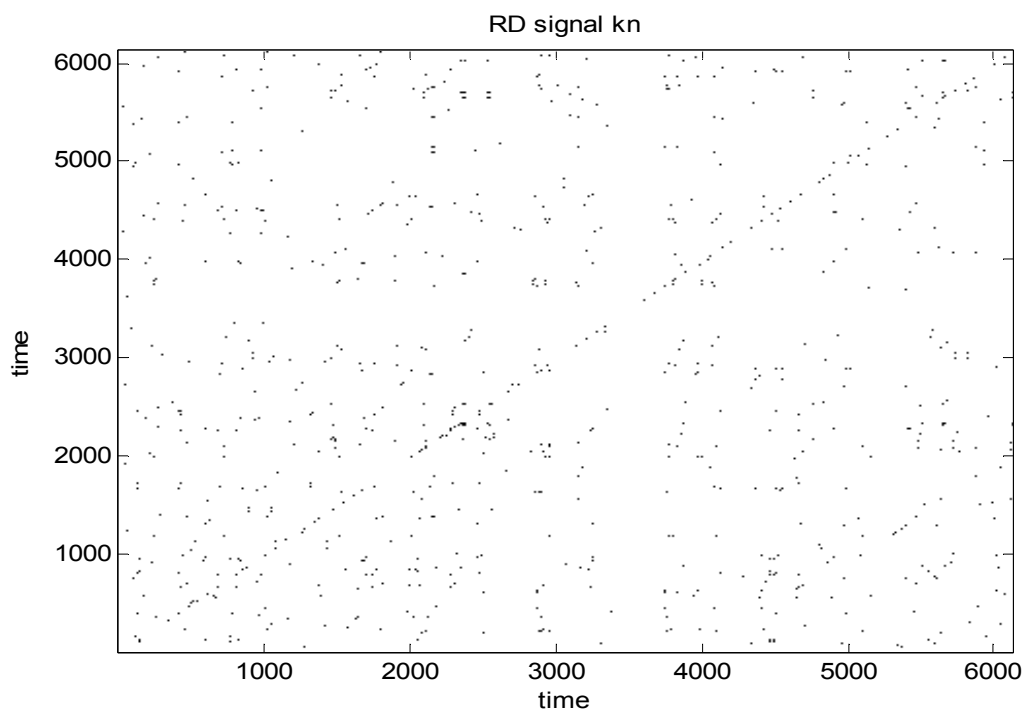


Рисунок 9 - Рекурентна діаграма сигналу O_2 ($m=4$, $\tau=15$, $\varepsilon = 0.1$)

Якщо дивитися на рис. 9 та рис. 5, то можливо відмітити їх деяку схожість. Але зробити якісь висновки досить складно й незручно.

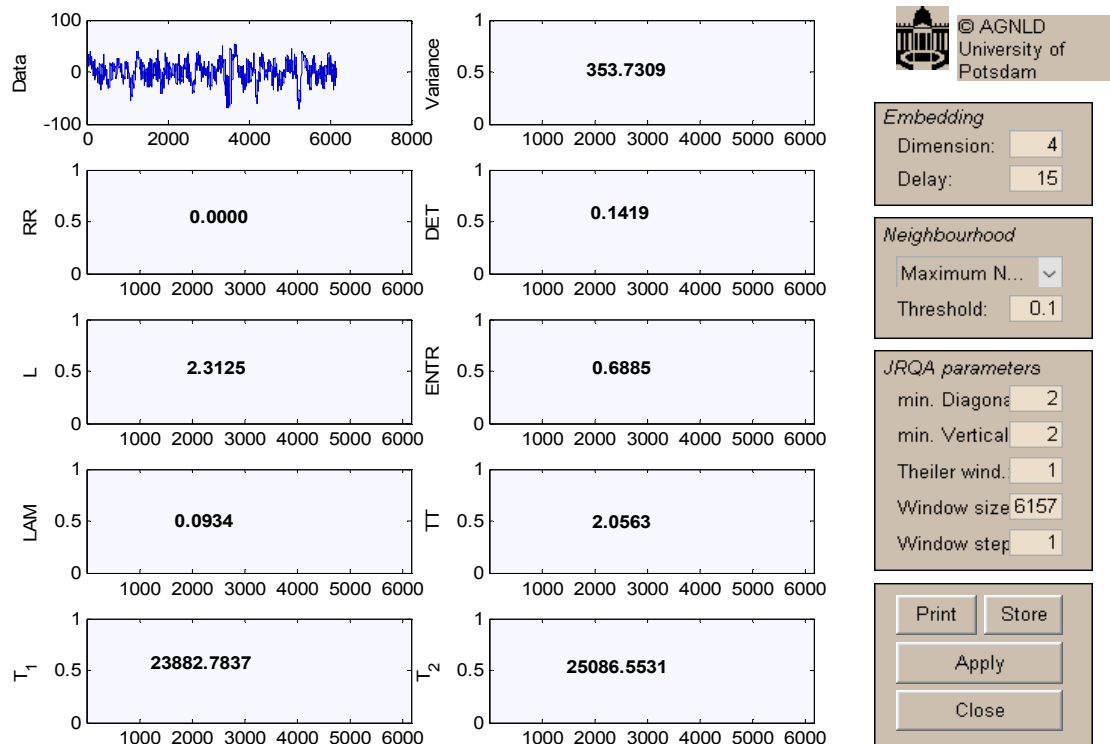


Рисунок 10 - Обрахунок JRQA параметрів для точки O_2 ($m=4$, $\tau=15$, $\varepsilon = 0.1$)

Якщо звернути увагу на рис.10 та рис.6, то зрозуміло стає їх різниця відносно наданих чисельних значень відповідних показників одного й того ж пацієнта, але в різних точках поверхні мозку. Тут потрібно пам'ятати, що це фактично чисельні параметри, які надають RP формальну характеристику.

3) Точка Pz.

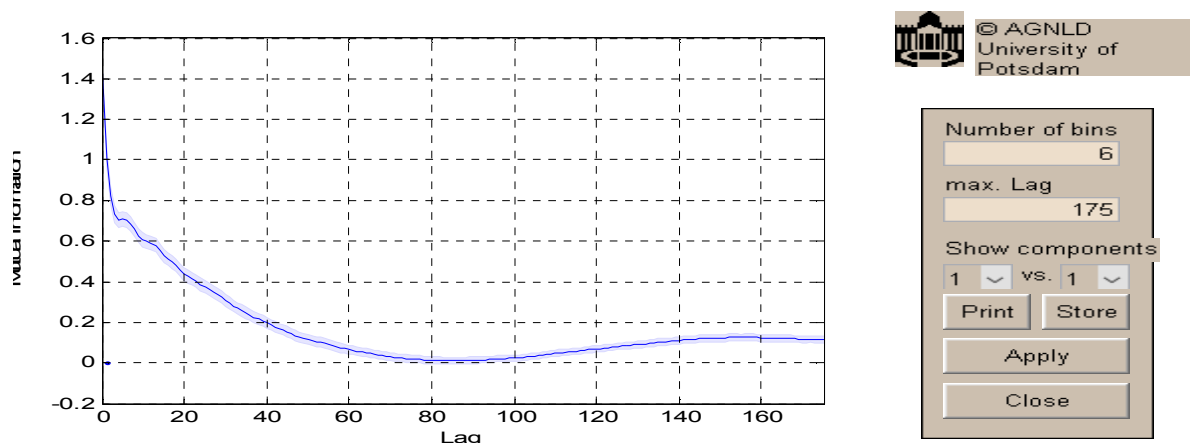


Рисунок 11 - Визначення τ для точки Pz (значення 5, 80)

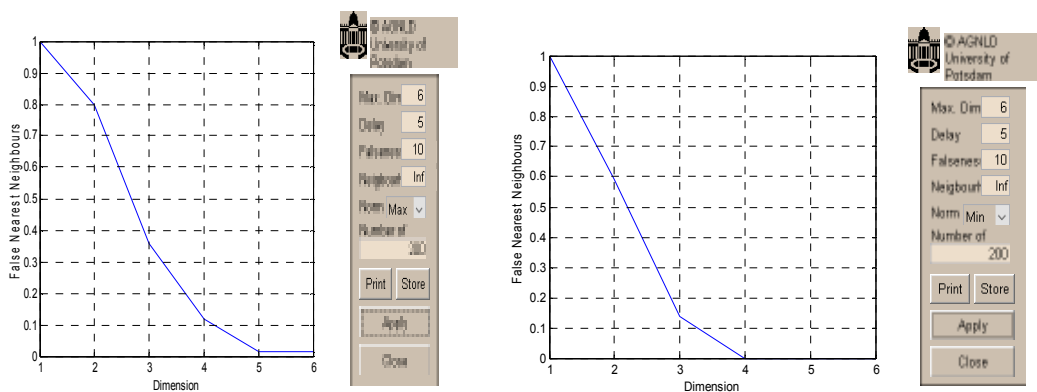


Рисунок 12 - Обрахування m для точки P_z , $\tau=5$ (перше значення ціле нижче 0.1) $m=5$ зліва та $m=4$ справа (надано для обох норм)

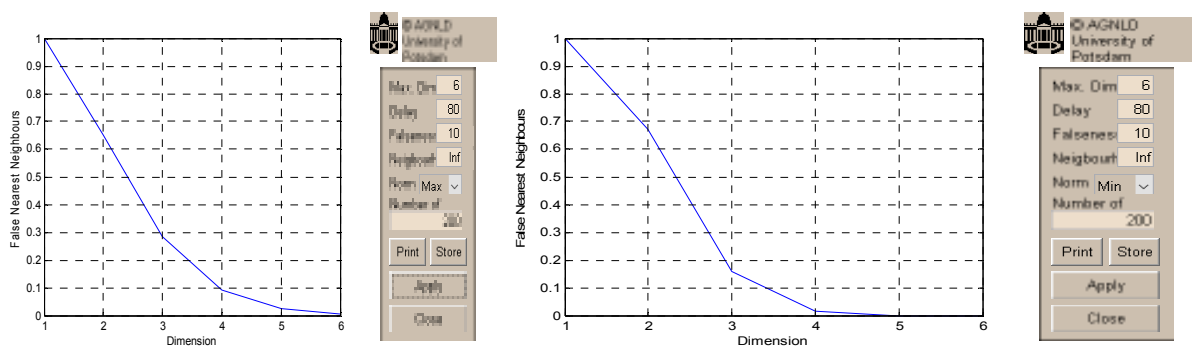


Рисунок 13 - Обрахування m для точки P_z , $\tau=80$ $m=4$ зліва та $m=4$ справа (надано для обох норм)

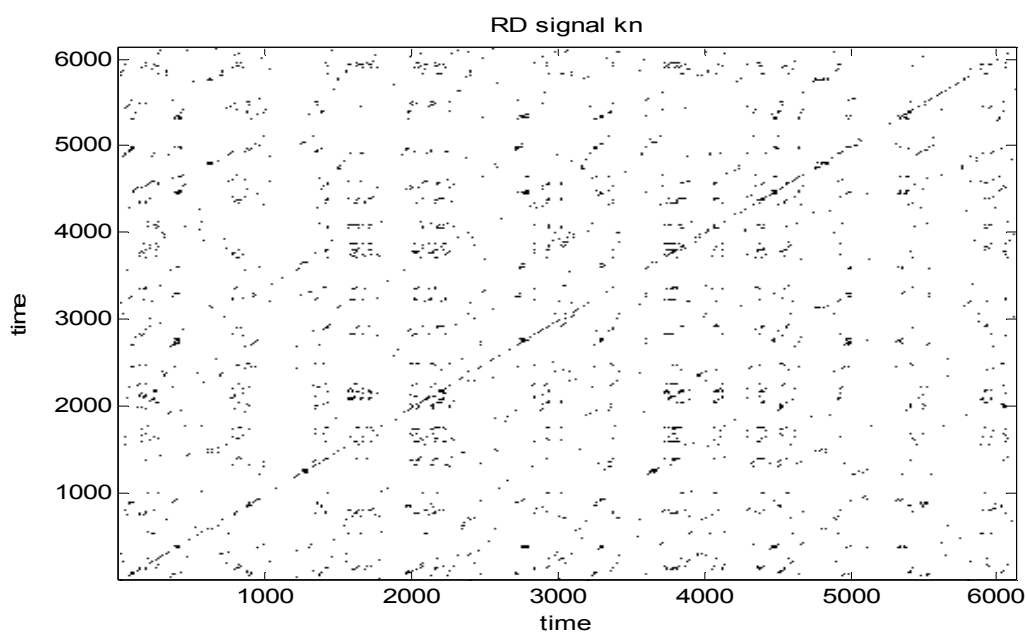


Рисунок 14 - Рекурентна діаграма RP сигналу P_z ($m=4$, $\tau=80$, $\varepsilon=0.1$)

Відносно RP, наданих на рис.5 та рис.9, маємо деяку схожість з рис.14 в одних маленьких квадратах аналізу та деяку розбіжність в інших квадратах наданих рекурентних діаграм. Зрозуміло, що в даному випадку необхідно надати перевагу при виконанні аналізу більш формальним, скоріше за все, чисельним показникам RP.

Для цього надаємо наступний обрахунок чисельних показників RP, що наведений на рис. 15 для точки Pz.

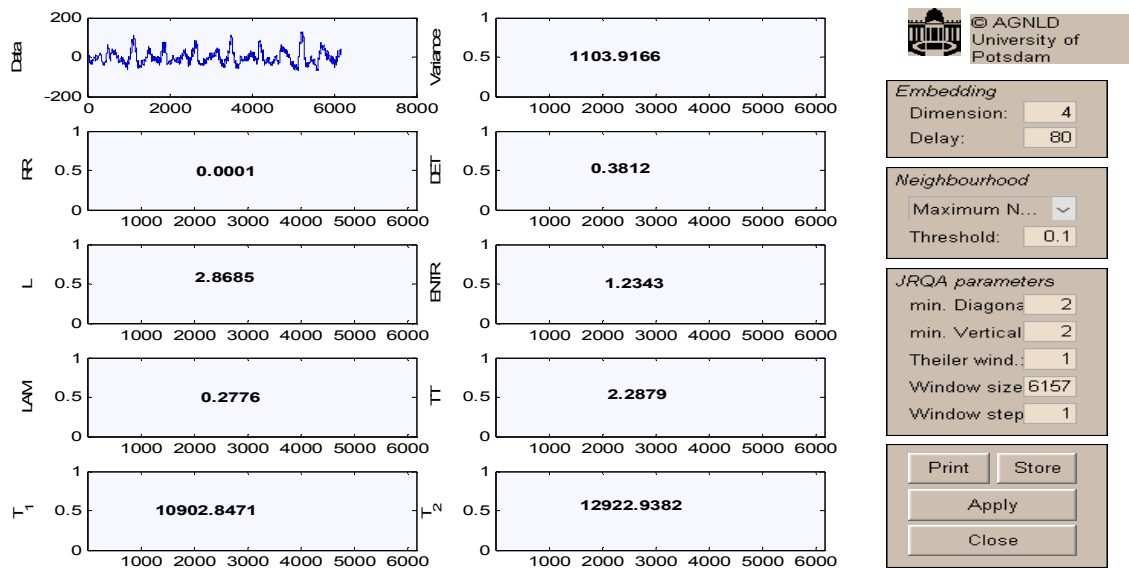


Рисунок 15 - Обрахунок JRQA параметрів сигналу Pz ($m=4$, $\tau=80$, $\varepsilon = 0.1$)

Перший аналіз отриманої інформації дозволяє зробити висновок, що використання самої RP діаграми для будь-якого візуального аналізу є доволі складним. Найявнішими є також деякі проблеми з визначення значень параметру затримки з представленого графіку (Рис.2, Рис.11). Далі оброблену інформацію для знятого 2020.06 року з пацієнта EEG записуємо в наступну таблицю.

Таблиця 1

2020.06	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0.0000	0.1735	0.7445	2.3421	0.0750	2.3189
O2	0.0000	0.1419	0.6885	2.3125	0.0934	2.0563
Pz	0.0001	0.3812	1.2343	2.8685	0.2776	2.2879

Потім, використовуючи надану методику, обробляємо та розраховуємо зняту інформацію EEG для усіх пацієнтів з нашої бази даних, які мають різні неврологічні патології. Відмітимо, що далі буде наведено остаточну таблицю, в

якій відображено оброблені показники усіх пацієнтів за усіма датами зняття ЕЕГ.

Результати обробки даних ЕЕГ пацієнтів, що описані у першому розділі, представлено у підсумковій таблиці 2.

Таблиця 2

Підсумкова таблиця обрахованих даних пацієнтів

Пацієнт 1

2016.11	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0,0575	0,364	1,1628	2,7121	0,4822	2,8246
O2	0,0584	0,38	1,1603	2,7099	0,5029	2,9048
Pz	0,0586	0,3718	1,1196	2,6649	0,4984	2,8481

2016.06	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0,0679	0,3884	1,04	2,6816	0,608	2,7932
O2	0,0803	0,5726	1,3386	2,9332	0,7197	3,2194
Pz	0,0629	0,4742	1,0509	2,5925	0,6047	2,8404

2017.10	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0,0591	0,3804	1,0467	2,5883	0,5085	2,7381
O2	0,0609	0,3973	1,0771	2,6193	0,5226	2,8487
Pz	0,0567	0,4523	1,1704	2,7216	0,5929	2,9402

2019	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0,0011	0,5289	1,1835	3,4821	0,5567	2,6237
O2	0	0,0756	0,753	2,3529	0,0662	2
Pz	0,0574	0,3888	1,1109	2,6552	0,5149	2,8209

2020	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0,0638	0,5515	1,3639	3,0565	0,7023	3,6087
O2	0,0567	0,3845	1,1629	2,7129	0,5107	2,9011
Pz	0,0564	0,4269	1,1607	2,7104	0,5649	2,9545

Пацієнт 2(БСД)

2003.06	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0,0002	0,1699	0,6218	2,2614	0,1737	2,0839
O2	0,0568	0,3726	0,9695	2,5135	0,491	2,7296
Pz	0	0,0723	0	2	0,0602	2

2004.03	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0	0,0275	0	2	0,0467	2
O2	0	0,0207	0	2	0,031	2
Pz	0	0,0297	0	2	0,0297	2

2014.11	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0	0,031	0	2	0,0245	2,1111
O2	0	0,0072	0	2	0,0217	2
Pz	0	0,0068	0	2	0,0305	2

2018.07	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0,0037	0,9913	4,3127	93,0352	0,9913	64,9825
O2	0,0321	0,822	1,441	3,524	0,8956	4,5377
Pz	0,0039	0,9956	4,4162	99,0192	0,9952	68,5908

2020.06	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0	0,0804	0,5894	2,2857	0,0716	2
O2	0	0,0083	0	2	0,029	2
Pz	0	0,2432	0	2	0,0811	2

Пацієнт 3

2014.04	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0	0,0418	0	2	0,0334	2
O2	0	0,0341	0,4101	2,1429	0,0318	2
Pz	0	0,0463	0	2	0,0428	2,0556

2015.04	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0,0017	0,9624	3,5394	59,2067	0,9558	42,3088

«Системні технології» 2 (145) 2023 «System technologies»

O2	0,004	0,988	4,7004	116,271	0,9861	88,6061
Pz	0,0132	0,9956	6,0337	285,5738	0,996	215,1959

2016	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0	0,244	0,9197	2,4872	0,0732	2
O2	0	0,3128	0,7624	2,3662	0,1173	2,4231
Pz	0	0,3674	1,0532	2,6196	0,1707	2,1748

2019	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0,0048	0,9938	4,6792	128,3688	0,9943	84,9472
O2	0,0003	0,8878	2,9879	81,6622	0,9017	12,4742
Pz	0,0016	0,9841	4,7266	142,5762	0,9849	42,6238

2020	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0	0,0486	0	2	0,0486	2
O2	0	0,0446	0	2	0,0557	2,1429
Pz	0	0,1014	0,4677	2,2	0,0515	2,0938

Пацієнт 4

2020.06	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0,1179	0,9849	1,784	85,3606	0,9923	155,54
O2	0,0188	0,9993	6,6501	409,9846	0,9994	287,9239
Pz	0,0268	0,9996	6,8157	476,941	0,9997	369,1939

2018.06	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0	0,0211	0	2	0,0176	2
O2	0	0,0287	0	2	0,0115	2
Pz	0,0028	0,4849	0,87	2,5713	0,6144	2,5018

Пацієнт 5

2020.06	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0	0,1735	0,7435	2,3421	0,075	2,1389
O2	0	0,1419	0,6885	2,3125	0,0934	2,0563
Pz	0,0001	0,3812	1,2343	2,8685	0,2776	2,2879

2019.09	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
---------	----	-----	------	---	-----	----

«Системні технології» 2 (145) 2023 «System technologies»

O1	0	0,0751	0,4293	2,1538	0,0489	2,0278
O2	0	0,141	0,6699	2,3478	0,0431	2,0625
Pz	0	0,0426	0	2	0,0426	2

Пацієнт 6(судомний синдром)

2020.06	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0	0,1564	0,417	2,1525	0,0967	2,059
O2	0	0,2153	0,6564	2,2838	0,1268	2,0947
Pz	0,0001	0,1157	0,8398	2,4186	0,1167	2,1868
2017.06	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0,0002	0,6956	1,5608	13,2638	0,6298	6,8087
O2	0,0006	0,9449	3,6527	64,6065	0,9394	18,6792
Pz	0,0107	0,9926	4,3295	134,2469	0,9937	126,1628

Пацієнт 7(здоров)

2021.02	RR	DET	ENTR	L	LAM	TT
O1	0,0006	0,9641	3,54	78,7448	0,9669	25,878
O2	0,0191	0,9994	6,6187	392,7604	0,9994	295,1036
Pz	0,0077	0,9997	6,1649	256,9337	0,9997	163,1964

Виміряні сигнали ЕЕГ можуть бути розділені на періоди, які характеризують функціональні стани кори головного мозку. Наприклад, для пацієнту, що має епілептичні захворювання це можуть бути:

- *преіктальний* (перед нападом) – період, що характеризується появою помітних відхилень від нормального стану;
- *іктальний* (власне сам напад) – наявні характерні прояви патологічної активності мозку;
- *постіктальний* (після нападу) – загасання патологічної активності;
- *інтеріктальний* (між нападами) – відсутні прояви патологічної активності.

Безпосередній порівняльний аналіз значень, який знайшов відображення у таблиці 3, дозволив виявити деякі нечіткі межі щодо ряду обрахованих чисельних показників. Ці показники дозволяють виконати розподіл пацієнтів на типи щодо вказаних даних. Їх аналіз дозволяє створити нечітку модель, яку можливо використати для розробки та створення відповідного програмного забезпечення.

При епілепсії типи ЕЕГ не є однорідними. Вдалося виділити 3 типи, які суттєво відрізняються між собою, кожен з них має суттєві відмінності від не-епілептичних типів ЕЕГ за параметрами: міра рекурентності, міра детермінізму, середня довжина діагональних ліній, міра ентропії, міра завмирання, середня довжина вертикальних структур, міра часу зупинки. Ці типи характеризуються наступними ознаками:

тип 1:

- показники $RR(O_1, O_2, Pz)$ мають усі значення біля нуля (<0.011);
- показники $DET(O_1, O_2, Pz)$, $LAM(O_1, O_2, Pz)$ значення різні, але з одного невеликого діапазону (наприклад, $[0.095-0.22]$ або $[0.62-0.99]$);
- якщо показники $ENTR(O_1, O_2, Pz)$ мають значення (>0 та <1), то показники $L(O_1, O_2, Pz)$, $TT(O_1, O_2, Pz)$ мають значення (<3.0),
- або якщо показники $ENTR(O_1, O_2, Pz)$ мають значення (>1.0), то показники $L(O_1, O_2, Pz)$, $TT(O_1, O_2, Pz)$ мають значення (>6.0).

тип 2:

- показники $RR(O_1, O_2, Pz)$ значення маленькі біля нуля (>0 та <0.2);
- показники $DET(O_1, O_2, Pz)$, $LAM(O_1, O_2, Pz)$ усі різні, але з одного невеликого діапазону, або ≥ 0.88 ;
- якщо показники $ENTR(O_1, O_2, Pz)$ мають значення (>0 та <1.4), то показники $L(O_1, O_2, Pz)$, $TT(O_1, O_2, Pz)$ мають значення (≥ 2 та ≤ 3.65); або
- якщо показники $ENTR(O_1, O_2, Pz)$ мають значення (>1.7), то показники $L(O_1, O_2, Pz)$, $TT(O_1, O_2, Pz)$ значення мають (≥ 12).

тип 3:

- показники $RR(O_1, O_2, Pz)$ усі значення біля нуля (≥ 0 та <0.06);
- показники $DET(O_1, O_2, Pz)$, $LAM(O_1, O_2, Pz)$ значення біля нуля (≥ 0 та <0.5) або їх значення DET та LAM (>0.8 та <1.0);
- якщо показники $ENTR(O_1, O_2, Pz)$ мають значення (≥ 0 та <1) або їх значення (>1.4);
- показники $L(O_1, O_2, Pz)$, $TT(O_1, O_2, Pz)$ значення мають (≥ 2 та <3) або L , TT (≥ 3.5).

Відмінності від епілептичних типів ЕЕГ встановлено за такими ознаками:

тип 4:

- показники $RR(O_1, O_2, Pz)$ значення біля нуля (>0 та <0.02);
- показники $DET(O_1, O_2, Pz)$, $LAM(O_1, O_2, Pz)$ значення біля одиниці (>0.96);
- показники $ENTR(O_1, O_2, Pz)$ більше (>3.5);
- показники $L(O_1, O_2, Pz)$, $TT(O_1, O_2, Pz)$ більше (>25.0).

На підставі проведеного обчислювального експерименту, який полягав у проведенні процедури – розрахунків чисельних показників рекурентних діаграм (RP)– авторам вдалося виділити один тип – «HEALTHY-RP», якій відрізняє епілептичні та неепілептичні типи ЕЕГ. При неепілептичних типах ЕЕГ значення цього типу та його показників надано у типі 4. Для епілептичних типів сигналів: це тип 1, тип 2 або тип 3 .

Обговорення результатів. У наступному пропонується розглянути:

1. Задачу типізації об'єктів за ознаками методу нечіткої логіки . Для автоматизації розв'язання задачі буде запропоновано використовувати нечітку модель представлення знань, побудовану з використанням навчальної вибірки та систему нечіткого логічного виводу. Автоматичне формування системи нечітких логічних правил відбувається в процесі навчання. У процесі навчання відбувається й налаштування параметрів моделі – нечітких границь термів.

2. Задачу побудови математичної моделі захворювання епілепсії у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь 5-го порядку, тому що $m=5$, з використанням реальних даних часових рядів ЕЕГ та SYNDy підходу.

Висновки

1. У роботі наведено методику розрахунків чисельних показників рекурентної діаграми (RP) та визначення нейрофізіологічного значення її параметрів — *міра рекурентності* (RR ймовірність повторення стану), *міра детермінізму* (DET більше значення детермінізму вказує більш сильну передбачуваність системи), *середня довжина діагональних ліній*(чим більше значення L, тим менша випадковість, тобто легше визначити поведінку ознаки системи), *міра ентропії* (ENTR відображає складність детерміністської складової у системі. Велике значення ентропії має на увазі періодичність системи, а низьке - хаотичність. Інакше кажучи, велика ентропія слідує за складнішою системою), *міра завмирання* (LAM ламінарність обчислює ймовірність того, що стан залишиться для наступного тимчасового кроку), *міра часу зупинки* (TT характеризує середній час, який система може провести у певному стані або тривалість часу, протягом якого кожен стан перебуває у пастці) для ЕЕГ даних пацієнтів з клінічно підтвердженою епілепсією та без такої.

2. Аналіз отриманої інформації дозволив визначити 3 типи даних у пацієнтів з епілепсією та 1 тип даних у пацієнтів без такої:

Неепілептичні типи ЕЕГ мають такі ознаки:

- показники $RR(O_1, O_2, Pz)$ значення біля нуля (від 0 до 0.02);
- показники $DET(O_1, O_2, Pz)$, $LAM(O_1, O_2, Pz)$ значення біля одиниці (>0.96);

- показники $ENTR(O_1, O_2, Pz)$ більше 3.5;
- показники $L(O_1, O_2, Pz)$, $TT(O_1, O_2, Pz)$ більше 25.0.

3. Відміни патологічних типів ЕЕГ від неепілептичних доцільно оцінювати за параметрами $DET(O_1, O_2, Pz)$, $LAM(O_1, O_2, Pz)$. Якщо ці показники мають значення від 0.88 до 0.999 або є сполучення параметрів DET , LAM зі значеннями які менші 0.5; показники $ENTR(O_1, O_2, Pz)$ мають значення від 0.0 до 1.4, а показники $L(O_1, O_2, Pz)$, $TT(O_1, O_2, Pz)$ мають значення від 2.0 до 3.65 або $ENTR(O_1, O_2, Pz)$ мають значення більше від 1.7 та L , TT більше від 12.0 то є висока вірогідність наявності епілептичного патерну або характеру роботи мозку у розумінні його, як цілісної нейрональної системи.

4. В результаті обчислювального експерименту також винайдено та запропоновано виділити один тип – «HEALTHY-RP», який відрізняє епілептичні та неепілептичні типи ЕЕГ. При неепілептичних типах ЕЕГ значення його показників надано у типі 4. Для епілептичних типів сигналів: це тип 1, тип 2 або тип 3.

ЛІТЕРАТУРА

1. Belozyorov V.Ye., Zaytsev V. G. Mathematical modeling of parkinson's illness by chaotic dynamics methods// Вісник ДНУ. Серія "Моделювання". 2017. Том 25, № 8, Вип. 9. С. 21–39. DOI 10.15421/141702
2. Belozyorov V.Ye., Pohorielov O.V., Serdiuk V.N., Zaytsev V. G. New Approach to Problem of Diagnostics of Cerebral Cortex Diseases Using Chaotic Dynamics Methods// 7 th The international conference "Social Science and Humanity". 23–29, September, London, 2017. - №2.--P.7 – 28.
3. Torse Dattaprasad, Veena Desai, Rajashri Khanai. "Classification of Epileptic Seizures using Recurrence Plots and Machine Learning Techniques". <https://www.researchgate.net/publication/332675878>.
4. Recurrence Quantification Analysis. [Online] Available: <http://www.recurrence-plot.tk/rqa.php>.
5. "Systems with Emphasis on Multi-domain Feature Extraction and Classification using Machine Learning," BRAIN Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience 8.4. 2017., p. 109-129.
6. Kirichenko L.O., Stepanenko Y.D., Yandukov D.Y. Time series classification using recurrence charts//System technologies. N 5(136) - Dnipro, 2021.- P.81 – 87. DOI 10.34185/1562-9945-5-136-2021-08
7. Нервові хвороби / С.М. Віничук, Є.Г. Дубенко, Є.Л. Мачерет та ін.; За ред. С.М. Віничука, Є.Г. Дубенка. – К.: Здоров'я, 2001. – 696 с.

8. Меклер А.А. Применение аппарата нелинейного анализа динамических систем для обработки сигналов ЭЭГ // Актуальные проблемы современной математики: учёные записки. п/ред. проф. Калашникова Е.В., изд. ЛГУ им. А.С. Пушкина, С.-Пб., 2004 г. Т. 13 (вып. 2), с. 112 – 140.
9. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Germany
<http://tocsy.pik-potsdam.de>
10. Белозеров В.Е., Зайцев В.Г. Влияние порога рекуррентности и параметра запаздывания временного ряда на информативность его рекуррентной диаграммы (на примерах хаотических аттракторов). Системные технологии моделирования сложных систем/ Монография под общ. ред. проф. А. И. Михалева.- Днепр: НМетАУ_ИБК “Системные технологии”, 2016. -608 с. - с. 67-90.
11. Бодянский Е.В., Кучеренко Е.И., Михалев А.И. Нейро-фаззи сети Петри в задачах моделирования сложных систем/ Монография.- Дніпропетровськ: Системні технології, 2005. – 311 с.
12. Richard O. Duda, Peter E. Hart, David G. Stork Pattern Classification, 2nd Edition. Wiley-Interscience, 2001. 688 p.

REFERENCES

1. Belozyorov V.Ye., Zaytsev V. G. Mathematical modeling of parkinson’s illness by chaotic dynamics methods // Bulletin of DNU. Series "Modeling". 2017. Volume 25, No. 8, Vip. 9. P. 21–39. DOI 10.15421/
2. Belozyorov V.Ye., Pohorielov O.V., Serdiuk V.N., Zaytsev V. G. New Approach to Problem of Diagnostics of Cerebral Cortex Diseases Using Chaotic Dynamics Methods// 7 th The international conference “Social Science and Humanity”. 23–29, September, London, 2017. - №2.--P.7 – 28.
3. Torse Dattaprasad, Veena Desai, Rajashri Khanai.“Classification of Epileptic Seizures using Recurrence Plots and Machine Learning Techniques”.
<https://www.researchgate.net/publication/332675878>.
4. Recurrence Quantification Analysis. [Online] Available: <http://www.recurrence-plot.tk/rqa.php>.
5. Systems with Emphasis on Multi-domain Feature Extraction and Classification using Machine Learning," BRAIN Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience 8.4. 2017., p. 109-129.
6. Kirichenko L.O., Stepanenko Y.D., Yandukov D.Y. Time series classification using recurrence charts// System technologies. N 5(136) - Dnipro,2021.- P.81 – 87. DOI 10.34185/1562-9945-5-136-2021-08

7. Nervous ailments / S.M. Vinichuk, E.G. Dubenko, E.L. Macheret and in.; For red. CM. Vinichuk, E.G. Dubenka. - K.: Health, 2001. - 696 p.
8. Mekler A.A. Application of the Apparatus for Nonlinear Analysis of Dynamic Systems for EEG Signal Processing // Actual Problems of Modern Mathematics: Scientific Notes. p / ed. prof. Kalashnikova E.V., ed. LGU them. A.S. Pushkin, St. Petersburg, 2004. T. 13 (issue 2), p. 112-140.
9. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Germany
<http://tocsy.pik-potsdam.de>
10. Belozyorov V.Ye., Zaytsev V.G. Influence of the recurrence threshold and the delay parameter of a time series on the information content of its recurrent diagram (on the examples of chaotic attractors). System technologies for modeling complex systems/Monograph under the general. ed. prof. A. I. Mikhaleva. - Dnepr: NMetAU_IVK "System Technologies", 2016. -608 p. - p. 67-90.
11. Bodyansky E.V., Kucherenko E.I., Mikhalev A.I. Neuro-fuzzy Petri nets in the problems of modeling complex systems / Monograph. - Dnipropetrovsk: System Technologies, 2005. - 311 p.
12. Richard O. Duda, Peter E. Hart, David G. Stork Pattern Classification, 2nd Edition. Wiley-Interscience, 2001. 688 p.

Received 01.03.2023.
Accepted 03.03.2023.

***Using the method of nonlinear recursive analysis
for typifying electroenceelography time series data***

This paper considers the issue of using the method of nonlinear recurrent analysis to the problem of typing information provided in the form of time series data of electroencephalograms (EEG) taken from a patient. A technique for determining hidden information for this series and its use for constructing the corresponding recurrence diagram (RP) at the points of information retrieval are described. It is shown that the use of RP has significant drawbacks associated with the visualization of information on a computer monitor screen, so another way of research is proposed - the calculation of numerical indicators of RP. Their calculation must be carried out for each point of the seventh information, for which it was proposed to take the points (O_1 , O_2 , Pz) - these are the right and left occipital and parietal taps. The given RP indicators made it possible to typify the obtained data and determine the type of which was called "HEALTHY-RP", which distinguishes epileptic and non-epileptic EEG types.

Білозьоров Василь Євгенович - доктор фізико-математических наук, професор кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Зайцев Вадим Григорьевич – кандидат фізико-математических наук, доцент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Погорелов Алексей Викторович – д.мед.н., професор кафедри неврології Дніпровського державного медичного університету.

Хижа Александр Леонидович – кандидат фізико-математических наук, доцент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Belozyorov Vasily - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of computer Technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

Zaytsev Vadym - Ph.D., Associate Professor, Department of computer Technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

Pohorielov Oleksiy - Doctor of Medical sciences, professor of the department of neurology, Dnipro State Medical University.

Khyzha Oleksandr - Ph.D., Associate Professor, Department of computer Technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ БАГАТОКОЛІРНИХ ШТРИХКODOVИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Анотація. Багатоколірні штрихові коди дозволяють у декілька разів підвищити інформаційну щільність подання даних порівняно з чорно-білими штриховими кодами. Однак, при цьому ускладнюються процеси розпізнавання та декодування багатоколірних штрихкодів зображень. Метою дослідження є розробити систему контролю спотворень графічних компонентів багатоколірного штрихкодів зображення, яка б забезпечувала надійне відтворення даних при скануванні багатоколірного штрихового коду великої ємності. Показано, що для надійного зберігання даних в багатоколірних штрихкодів зображеннях великої ємності необхідно проектувати ШК-позначки з двома рівнями забезпечення завадостійкості. Запропоновано метод підвищення завадостійкості багатоколірних штрихових кодів, який ґрунтується на застосуванні дворівневого контролю помилок з використанням двох многозначних коректувальних кодів: коду БЧХ – на рівні штрихкодів знаків (нижній рівень), та коду Ріда-Соломона – на рівні штрихкодів позначки (верхній рівень). Це дає можливість створювати багатоколірні штрихові коди з поліпшеними характеристиками завадостійкості, які забезпечують надійне відтворення даних під час сканування багатоколірних штрихкодів зображень великої ємності в системах автоматичної ідентифікації.

Ключові слова: штрихове кодування, багатоколірні штрихові коди, многозначний код БЧХ, код Ріда-Соломона, автоматична ідентифікація.

Постановка проблеми

Штрихове кодування даних є одним з видів автоматичної ідентифікації. Маючи безперечні переваги – високу швидкість введення даних, низьку вартість виготовлення штрихкодів позначок (ШК-позначок), зручність застосування – штрихкодів технологія дозволяє значно повніше реалізувати можливості автоматизованих систем керування. Пройшовши певну еволюцію – лінійні штрихові коди (ШК), стекові, матричні – штрихкодів технологія автоматичної ідентифікації продовжує бути перспективною комп'ютерною технологією, яка охоплює дедалі ширші сфери людської діяльності. Протягом останнього десятиліття спостерігається стійка тенденція до розширення сфери

застосування багатоколірних штрихових кодів, оскільки багатоколірні штрихкодіві зображення дозволяють у декілька разів підвищити інформаційну щільність подання даних порівняно з чорно-білими ШК без зміни геометричних розмірів елементів зображення [1 - 5, 8]. Однак, при застосуванні багатоколірних ШК ускладнюються процеси розпізнавання та декодування штрихкодівих зображень. Дослідники в [4 - 7] зазначають, що причинами цього можуть бути: спотворення геометричних розмірів елементів зображення з різним забарвленням під час зчитування через певні оптичні ефекти; старіння барвників; згортання та розпливання фарби при виготовленні ШК-позначок тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Предметом дослідження в [6] стала спектральна відмінність в колірних каналах пристроїв друкування ШК-позначок, де використовують колірну палітру C, M, Y (C – cyan, блакитний; M – magenta, пурпуровий; Y – yellow, жовтий), та колірних каналах пристроїв зчитування ШК-позначок, в яких використовують палітру R, G, B (R – red, червоний; G – green, зелений; B – blue, синій). Щоб пом'якшити вплив міжканальних завад в колірних каналах при друкуванні ШК-позначок та колірних каналів пристроїв зчитування, автори розробили алгоритм усунення завад при реалізації процесів друкування та сканування. Внаслідок цього вдалось істотно знизити ймовірність помилок та підвищити швидкість декодування.

Інші дослідники, зокрема в [9, 10] запропонували способи збільшення інформаційної щільності QR-кодів за рахунок використання в структурі QR-коду багатоколірності штрихкодівих елементів, а в працях [1, 11] пропонується застосовувати мультиплексування та багатошаровість колірних штрихкодівих зображень.

У багатоколірному штриховому кодуванні надзвичайно важливою є проблема забезпечення завадостійкості штрихкодівих зображень. Аналіз останніх досліджень і публікацій, зокрема [2, 12, 13 - 15], в яких започатковано розв'язання даної проблеми, свідчить про те, що комплексне вирішення даного питання відсутнє, наявні лише окремі пропозиції, що не утворюють єдиного цілого. Невирішеним завданням є відсутність системного підходу при забезпеченні надійності зберігання інформації у вигляді багатоколірних ШК.

Мета дослідження

Для забезпечення надійного зберігання даних в багатоколірних штрихкодівих зображеннях великої ємності (декілька тисяч алфавітно-цифрових

символів) необхідно проектувати ШК-позначки з двома рівнями завадостійкості: 1) нижній рівень (рівень найменших структурних одиниць – ШК-знаків, коли ШК-знаки створюють так, щоб вони мали властивість завадостійкості у випадку спотворення одного-двох елементів знака; 2) верхній рівень (рівень усієї ШК-позначки), коли у випадку спотворень певної кількості ШК-знаків, таких, які неможливо усунути в межах нижнього рівня, забезпечується цілісність зчитуваних даних.

Метою дослідження є створення системи контролю спотворень компонентів багатоколірного штрихкового зображення, яка б забезпечувала надійне відтворення даних при скануванні багатоколірного штрихового коду великої ємності.

Виклад основного матеріалу дослідження

Структурно ШК-позначка складається з масиву ШК-знаків, упорядкованих у вигляді прямокутника або квадрата (рис. 1).

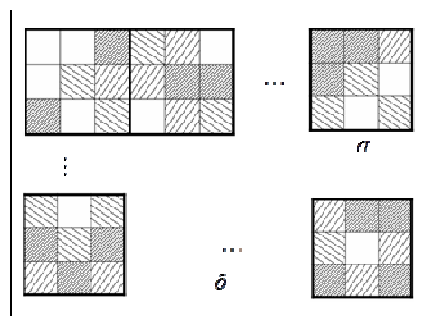


Рисунок 1 - Структура багатоколірної штрихкової позначки:

a – ШК-знак; b – ШК-позначка

Будь-який ШК має свій набір ШК-знаків, кожен з яких позначає символ (або комбінацію символів) комп'ютерного алфавіту. Цей набір ШК-знаків називають символікою штрихового коду.

Нехай необхідно створити символіку завадостійкого багатоколірного матричного ШК з параметрами q, s ; де q – кількість використовуваних кольорів для розфарбовування елементів ШК-знака, коли $q > 2$; s – кількість елементів (чарунок) у ШК-знаку (див. рис. 1).

Кольори, якими можуть бути забарвлені елементи ШК-знаків, позначитимемо цифрами: $0, 1, 2, \dots, q-1$. ШК-знаку, що складається з s елементів, поставимо у відповідність цифровий еквівалент – вектор ШК-знака

$$Z = (z_0 z_1 \dots z_{s-1}), \text{ де } z_i \in \{0, 1, 2, \dots, q-1\}.$$

Для того, щоб ШК-знак був завадостійким, його вектор Z має бути кодовим словом многозначного ($q > 2$) коректувального коду, здатного виправляти

спотворення (помилки). Вважатимемо, що під час зчитування з носія ШК-знаків найбільш ймовірними є випадки ушкодження (спотворення) одного або двох елементів у межах ШК-знака. У такому разі вектор Z ШК-знака має бути кодовим словом коректувального коду з мінімальною кодовою відстанню $d_{\min}=5$. Таким коректувальним кодом може бути многозначний (q -ковий) код БЧХ (код Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема), $q>2$.

Код БЧХ є циклічним коректувальним кодом, у якому кодування інформації зводиться до множення многочлена $B(x) = \sum_{i=0}^{u-1} b_i x^i$ степеня $u-1$, який відповідає q -ковому u -розрядному інформаційному слову $B = (b_0 b_1 \dots b_{u-1})$, на твірний (генераторний) многочлен $g(x) = \sum_{i=0}^v g_i x^i = g_0 + g_1 x + \dots + g_v x^v$ степеня v :

$$Z(x) = B(x)g(x),$$

де $Z(x) = \sum_{i=0}^{s-1} z_i x^i$ - многочлен степеня $s-1$, що відповідає s -розрядному q -ковому кодовому слову $Z = (z_0 z_1 \dots z_{s-1})$, який є цифровим еквівалентом ШК-знака; $s = u + v$; $b_i, g_i, z_i \in GF(q)$ [15].

Якщо відомий твірний многочлен $g(x)$, то твірну матрицю $G_{(s,u)}$ (s, u)-коду БЧХ подають у вигляді:

$$G_{(s,u)} = \begin{pmatrix} g(x) \\ xg(x) \\ \vdots \\ x^{u-1}g(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_0 g_1 \dots g_v & 0 & \dots & 0 \\ 0 & g_0 \dots g_{v-1} & g_v & 0 \dots 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & 0 & g_0 & g_1 & \dots & g_v \end{pmatrix},$$

вона має розмірність $u \times s$.

Деякі q -кові ($q>2$) повні коди БЧХ з $d_{\min}=5$ наведено в табл. 1. Код БЧХ називають повним, якщо $s=q^m-1$.

Нехай $q=4$ (випадок 4-колірного ШК). Розглянемо, наприклад, четвірковий (15, 9)-код БЧХ (див. табл. 1).

Для побудови такого коду використовують два поля: $GF(2^2)$ – поле символів (рис. 2) та $GF((2^2)^2)$ – поле локаторів (табл. 2), яке є розширенням над $GF(2^2)$.

Деякі повні q -кові (s, u) -коди БЧХ

Кількість кольорів	$q=3$	$q=4$	$q=5$	$q=7$	$q=8$
Поле символів	$GF(3)$	$GF(2^2)$	$GF(5)$	$GF(7)$	$GF(2^3)$
(s, u) -код БЧХ	$(8, 3)$ - $(26, 17)$ -	$(15, 9)$ -	$(24, 16)$ -	$(48, 40)$ -	$(63, 55)$ -
Поле локаторів	$GF(3^2)$ $GF(3^3)$	$GF((2^2)^2)$	$GF(5^2)$	$GF(7^2)$	$GF((2^3)^2)$

У полі $GF(2^2)$ оперують з чотирма символами: 0, 1, 2, 3.

На основі твірної матриці $G_{(15, 9)}$ коду БЧХ з $d_{\min}=5$ можна побудувати символіку завадостійкого штрихового коду з можливістю корекції двократних помилок у ШК-знаках.

Для цього u -розрядне інформаційне q -кове слово $B = (b_0 b_1 \dots b_{u-1})$ необхідно перетворити в s -розрядне кодове слово $Z = (z_0 z_1 \dots z_{s-1})$, яке є вектором (цифровим еквівалентом) ШК-знака, тобто закодувати слово B (s, u) -кодом БЧХ, а потім вектору Z поставити у відповідність ШК-знак.

Операцію кодування задають рівнянням $Z = B \cdot G_{(s,u)}$ та виконують за правилами поля $GF(2^2)$.

ШК-знаки наносять на носій, формуючи ШК-позначку.

На основі твірної матриці $G_{(15, 9)}$ коду БЧХ можна побудувати символіку ШК потужності $4^9=262144$ ШК-знаки. Однак, для практичних потреб штрихового кодування даних необхідно мати символіки менших потужностей. Для їх отримання слід розглядати скорочені (неповні) коди БЧХ.

Щоб отримати скорочений код БЧХ необхідно скоротити твірну та перевірку матриці повного коду БЧХ (всі зазначені в табл. 1 коди є повними).

Наприклад, якщо в твірній матриці $G_{(15, 9)}$ повного $(15, 9)$ -коду БЧХ викреслити два крайні стовпці справа та 2 нижні рядки, а в перевірній матриці $H_{(15,9)}$ – два стовпці справа, то отримаємо твірну матрицю $G_{(13, 7)}$ та перевірку матрицю $H_{(13,7)}$ четвіркового скороченого $(13, 7)$ -коду БЧХ.

Послідовно викреслюючи в $G_{(15, 9)}$ праві стовпці та нижні рядки, а в $H_{(15,9)}$ – відповідні праві стовпці, отримаємо низку четвіркових скорочених кодів БЧХ: $(14, 8)$ -; $(13, 7)$ -; $(12, 6)$ -; $(11, 5)$ -; $(10, 4)$ -; $(9, 3)$ -; $(8, 2)$ -.

На основі цих скорочених кодів БЧХ можна синтезувати символи завадостійких штрихових кодів різної потужності.

Наприклад, на основі твірної матриці $G_{(9,3)}$ (рис. 3), отриманої з $G_{(15,9)}$, побудуємо символіку чотириколірного завадостійкого штрихового коду з можливістю корекції двократних помилок у ШК-знаках.

$$G_{(9,3)} = \begin{matrix} & z_0 & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 & z_6 & z_7 & z_8 \\ \begin{matrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 3 & 1 \end{vmatrix} \end{matrix}$$

$$H_{(9,3)} = \begin{matrix} & z'_0 & z'_1 & z'_2 & z'_3 & z'_4 & z'_5 & z'_6 & z'_7 & z'_8 \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 3 & 1 & 0 & 2 & 2 & 1 \\ 0 & 2 & 2 & 1 & 2 & 0 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 1 & 0 & 3 & 3 & 1 & 3 & 0 \\ 0 & 3 & 2 & 2 & 3 & 0 & 3 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 0 & 2 & 1 & 1 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 1 & 3 & 1 & 0 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 3 & 1 & 0 & 2 & 2 & 1 & 2 \end{vmatrix} \end{matrix}$$

Рисунок 2 - Твірна (G) та перевірна (H) матриці четвіркового скороченого $(9, 3)$ -коду БЧХ

ШК-знаки складаються з 9-ти елементів (рис. 4), кожен елемент може бути розфарбований одним з чотирьох кольорів. ШК-знаку відповідає 9-розрядний вектор ШК-знака $Z=(z_0z_1z_2z_3z_4z_5z_6z_7z_8)$.

Для отримання вектора ШК-знака $Z=(z_0z_1...z_8)$ необхідно виконати множення інформаційного слова $B=(b_0b_1b_2)$ на твірну матрицю $G_{(9,3)}$ в полі $GF(2^2)$ (див. рис. 2): $Z=B \cdot G_{(9,3)}$.

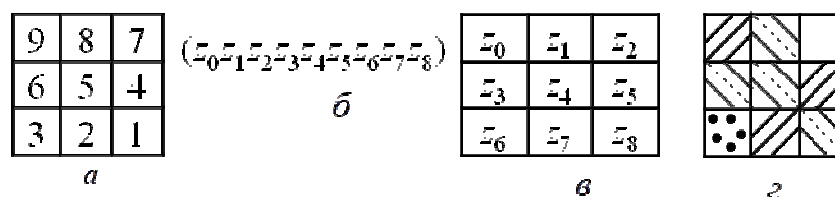


Рисунок 3 - Формування ШК-знаків 4-колірного завадостійкого ШК з можливістю виправлення двократних спотворень (помилки) у ШК-знаках:

a – структура ШК-знака; *б* – вектор ШК-знака; *в* – порядок заповнення ШК-знака; *г* – ШК-знак, якому відповідає вектор $Z=(2\ 3\ 0\ 3\ 3\ 2\ 1\ 2\ 3)$

Нехай $B=(2\ 0\ 3)$.

Тоді: $z_0=2\cdot1+0\cdot0+3\cdot0=2$; $z_1=2\cdot2+0\cdot1+3\cdot0=3$; $z_2=2\cdot2+0\cdot2+3\cdot1=0$; $z_3=2\cdot1+0\cdot2+3\cdot2=3$; $z_4=2\cdot1+0\cdot1+3\cdot2=3$; $z_5=2\cdot3+0\cdot1+3\cdot1=2$; $z_6=2\cdot1+0\cdot3+3\cdot1=1$; $z_7=2\cdot0+0\cdot1+3\cdot3=2$; $z_8=2\cdot0+0\cdot0+3\cdot1=3$.

Отже, $Z=(2\ 3\ 0\ 3\ 3\ 2\ 1\ 2\ 3)$.

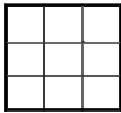
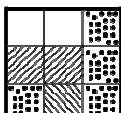
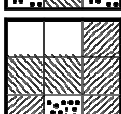
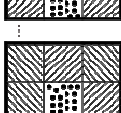
Ми отримали кодове слово в несистематичній формі (місцезнаходження контрольних розрядів – невідоме).

Отриманому кодовому слову Z відповідає ШК-знак на рис. 4г.

Беручи всі можливі значення інформаційного слова B – від 0 0 0 до 3 3 3 та виконуючи множення слова B на матрицю $G_{(9,3)}$ отримаємо $4^3=64$ різні ШК-знаки, які утворюють символіку завадостійкого 4-колірного ШК, в якому в ШК-знаках при їх зчитуванні з носія можливе виправлення одно- або двократних спотворень елементів (помилки) (табл. 2). Цій символіці можна поставити у відповідність числову множину $\Omega=\{0, 1, 2, \dots, 62\}$ (ШК-знак, якому відповідає $B=0\ 0\ 0$, не використовується).

Для створення ШК-позначки алфавітно-цифрову послідовність, яка підлягає поданню в штрихкодovому вигляді, перетворюють у числову форму, використовуючи числа з діапазону 0 – 62, а потім кожному числу ставлять у відповідність ШК-знак з табл. 2. Далі ШК-знаки наносять на носій.

Структура символіки 4-колірного завадостійкого ШК з можливістю виправлення двократних помилок у ШК-знаках

Інформаційне слово	Вектор ШК-знака	ШК-знак	Номер ШК-знака в символіці
000	000000000		–
001	001221131		0
002	002332212		1
⋮			
333	323312213		62

Нехай у штрихкодovому вигляді необхідно подати k ШК-знаків, що утворюють інформаційне слово $A=(a_{k-1} a_{k-2} \dots a_1 a_0)$, якому поставимо у відповідність многочлен $a(x) = \sum_{i=0}^{k-1} a_i x^i$. Кожен ШК-знак утворено на основі коду БЧХ. Для

забезпечення цілісності даних (оскільки ШК-позначка є відкритим носієм інформації, що може піддаватися небажаним зовнішнім впливам, завадам) застосуємо коректувальний код Ріда-Соломона, який долучає до інформаційного слова A r контрольних розрядів. Внаслідок цього на носій буде нанесено n ШК-знаків, які утворюють кодове слово $C=(c_{n-1} a_{n-2} \dots c_1 c_0)$, якому

поставимо у відповідність многочлен $c(x) = \sum_{j=0}^{n-1} c_j x^j$, де $n - k = r$. Слово C от-

римують як результат процедури кодування: $c(x)=a(x) \varphi(x)$, де $\varphi(x)$ – твірний многочлен коду Ріда-Соломона. Вважатимемо, що операції над коефіцієнтами многочленів виконують за модулем простого числа P . Якщо потужність символіки ШК становить $W=q^u$ ШК-знаків, то P має задовольняти умову $P < W$. При цьому P ШК-знаків символіки використовують для подання даних на носії, а решта $R=W - P$ ШК-знаків є службовими, і використовуються для налаштування сканера штрихового коду. Вважатимемо, що максимальна ємність ШК-позначки не перевищує $P-1$ ШК-знаків, тобто $n \leq P-1$.

Твірний многочлен $\varphi(x)$ коду Ріда-Соломона визначають як

$$\varphi(x)=(x-\beta)(x-\beta^2)\dots(x-\beta^r)=x^{r+1}+\varphi_{r-1}x^{r-1}+\dots+\varphi_1x+\varphi_0,$$

де β – примітивний елемент поля $GF(P)$. Примітивним елементом поля $GF(P)$ є ціле число всі можливі степені якого за модулем P дають всі ненульові елементи поля, тобто числа $1, 2, \dots, P-1$.

Код Ріда-Соломона має мінімальну кодову відстань $d^*=n-k+1=r+1$. З іншого боку, відомо, що коректувальний код з мінімальною кодовою відстанню d^* дозволяє декодувати будь-яку конфігурацію з t помилок та ρ стирань за умови, що $d^* \geq 2t+1+\rho$, де під помилкою розуміють таке спотворення у слові C , коли не відоме ні його місцезнаходження у слові, ні його величина; а під стиранням – спотворення, місцезнаходження якого у слові відоме, але не відома тільки його величина (у данному разі стирання є математичним поняттям, а не фізичним) [16].

Отже,

$$r \geq 2t + \rho \quad (1)$$

Це співвідношення дає можливість користувачу обирати потрібну кількість контрольних розрядів для захисту цілісності даних залежно від ємності ШК-позначки та середовища використання штрихового коду, регулюючи таким чином рівень захищеності.

Наприклад, якщо є потреба виправляти в словах $t=2$ помилки та $\rho=3$ стирання, то кількість контрольних розрядів має становити 7.

Зі співвідношення (1) випливає, що для корекції кожної помилки в коді Ріда-Соломона витрачаються два контрольні розряди, а для корекції кожного стирання – один контрольний розряд.

Нехай у штрихкодovому вигляді необхідно подати повідомлення, якому відповідають 6 ШК-знаків чотириколірного ШК, символіка якого наведена в табл. 2. Вважатимемо, що в цій символіці для подання даних використовують 59 ШК-знаків, занумерованих від 0 до 58, а решта ШК-знаків – службові. Невелика довжина повідомлення (6 ШК-знаків) обрана для спрощення прикладів кодування-декодування; реальні ШК-позначки у своєму складі налічують від кількох сотень до кількох тисяч ШК-знаків.

Вважатимемо, що повідомленню відповідає 6-розрядне інформаційне слово $A=(a_5a_4a_3a_2a_1a_0)=(31 \ 28 \ 0 \ 12 \ 58 \ 4)$, розряди якого є цифровими еквівалентами відповідних ШК-знаків символіки з табл. 2. Задамо кількість контрольних розрядів, наприклад, $r=6$. Така кількість контрольних розрядів дозволяє виправляти такі конфігурації помилок (t) та стирань (ρ): $t=3, \rho=0$; t

$= 2, \rho=2; t = 1, \rho=4; t = 0, \rho=6$. Тоді твірний многочлен коду Ріда-Соломона дорівнює $\varphi(x)=(x-2)(x-2^2)\dots(x-2^6)=x^6-8x^5+16x^4-13x^3+42x^2-33x+56=x^6+51x^5+16x^4+46x^3+42x^2+26x+56$ (коефіцієнти обчислено за $\text{mod } 59$).

Закодуємо слово A коректувальним кодом Ріда-Соломона:

$$c(x)=a(x)\varphi(x)=(31x^5+28x^4+12x^2+58x+4)\cdot(x^6+51x^5+16x^4+46x^3+42x^2+26x+56)=$$

$$=31x^{11}+16x^{10}+36x^9+57x^8+15x^7+3x^6+18x^5+25x^4+41x^3+47x^2+48x+47.$$

Кодове слово дорівнює:

$$C=(31 \ 16 \ 36 \ 57 \ 15 \ 3 \ 18 \ 25 \ 41 \ 47 \ 48 \ 47) \quad (2)$$

$$C_{11} \ C_{10} \ C_9 \ C_8 \ C_7 \ C_6 \ C_5 \ C_4 \ C_3 \ C_2 \ C_1 \ C_0.$$

Кожному розряду слова C відповідає ШК-знак з табл. 2. ШК-знаки послідовно наносять на носій формуючи прямокутну ШК-позначку, що містить 12 ШК-знаків.

Під час зчитування багатоколірного штрихкового зображення послідовно виокремлюють ШК-знаки, формуючи n -розрядне слово (одновимірний масив ШК-знаків) $C'=(c'_{n-1} \ c'_{n-2} \dots \ c'_1 \ c'_0)$. Причому, на момент декодування декодеру коду Ріда-Соломона відомі параметри n та r (n – загальна кількість ШК-знаків у ШК-позначці, r – кількість контрольних ШК-знаків). При декодуванні зчитаного слова C' декодер має виправляти спотворення двох видів – стирання та помилки.

Процес декодування розглянемо на прикладі зчитування ШК-позначки, якій при її формуванні та нанесенні на носій відповідало кодове слово (2). Нехай внаслідок ушкоджень зазнали спотворень чотири ШК-знаки, а саме ШК-знак c'_9 та c'_5 ідентифіковані як стирання, а c'_7 та c'_2 як помилки:

$$L: \ 42 \ 21 \ 40 \ 20 \ 10 \ 5 \ 32 \ 16 \ 8 \ 4 \ 2 \ 1$$

$$\beta^l: \ 2^{11} \ 2^{10} \ 2^9 \ 2^8 \ 2^7 \ 2^6 \ 2^5 \ 2^4 \ 2^3 \ 2^2 \ 2^1 \ 2^0$$

$$C' = (31 \ 16 \ \mathbf{0} \ 57 \ \underline{43} \ 3 \ \mathbf{0} \ 25 \ 41 \ \underline{18} \ 48 \ 47) \quad (3)$$

$$c'_{11} \ c'_{10} \ c'_9 \ c'_8 \ c'_7 \ c'_6 \ c'_5 \ c'_4 \ c'_3 \ c'_2 \ c'_1 \ c'_0$$

Для зручності декодування стирання замінені декодером коду Ріда-Соломона на нульові значення (це загальновизнаний прийом), які виділено жирним, а помилкові розряди підкреслено. Кожному розряду слова C' ставлять у відповідність локатор, який подають або у степеневому вигляді β^l , або у вигляді десяткового числа $L=(\beta^l) \text{mod } P$.

Декодування провадять в такій послідовності.

1. Обробляючи слово C' (3) справа наліво декодер фіксує номери розрядів $\varepsilon_1=5$ та $\varepsilon_2=9$, що містять стирання, а також кількість стирань $\rho=2$. Перевіряють відношення $\rho \leq r$. Якщо $\rho > r$, то кількість стирань перевищує коректувальну зда-

тність коду, і декодування слід припинити через невиправні спотворення. Якщо $\rho \leq r$, то знаходять локатори стирань $L_{\varepsilon_1} = 2^5 = 32$, $L_{\varepsilon_2} = 2^9 = 40$ (за mod 59).

2. Знаходять многочлен локаторів стирань

$$\lambda(x) = \prod_{i=1}^{\rho} (1 - L_{\varepsilon_i} x) = (1 - 32x)(1 - 40x) = 41x^2 + 46x + 1.$$

3. Визначають, яку максимальну кількість помилок t ще може виправити декодер після виявлення ρ стирань: $t = \text{int}((r - \rho)/2)$.

Наявна кількість μ помилок у зчитаному слові має задовольняти умову $\mu \leq t$.

Оскільки $r=6$, то максимальна кількість t помилок, яку може виправити декодер після виявлення двох стирань, становить $t = \text{int}((6 - 2)/2) = 2$.

4. Обчислюють компоненти $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_r$ синдрому спотворень $\Psi = (\Psi_1 \Psi_2 \dots \Psi_r)$: $\Psi_w = c'(\beta^w)$, $w=1, 2, \dots, r$,

де $c'(x) = \sum_{i=0}^{n-1} c'_i x^i$; c'_i – розряди зчитаного слова. Якщо всі компоненти синдрому спотворень Ψ дорівнюють нулю, то приймають рішення про відсутність спотворень у зчитаному слові.

$$\Psi_1 = c'(2^1) = 31(2^1)^{11} + 16(2^1)^{10} + 57(2^1)^8 + 43(2^1)^7 + 3(2^1)^6 + 25(2^1)^4 + 41(2^1)^3 + 18(2^1)^2 + 48(2^1)^1 + 47 = 36 \pmod{59};$$

$$\Psi_2 = c'(2^2) = 54; \Psi_3 = c'(2^3) = 15; \Psi_4 = c'(2^4) = 29; \Psi_5 = c'(2^5) = 1; \Psi_6 = c'(2^6) = 18.$$

Оскільки $\Psi \neq 0$ – слово C містить спотворені розряди.

5. Утворюють синдромний многочлен

$$\Psi(x) = 1 + \sum_{w=1}^r \Psi_w x^w = 1 + 36x + 54x^2 + 15x^3 + 29x^4 + x^5 + 18x^6.$$

6. Зі співвідношення $\Psi(x)\lambda(x) \equiv V(x) \pmod{x^{r+1}}$ знаходять модифікований синдромний многочлен спотворень, де $V(x) = 1 + \sum_{w=1}^r V_w x^w$, а $V_1, V_2, \dots, V_r$ – компоненти модифікованого синдрому спотворень:

$$(1 + 36x + 54x^2 + 15x^3 + 29x^4 + x^5 + 18x^6)(41x^2 + 46x + 1) \pmod{x^7} = 1 + 23x + 40x^2 + 22x^3 + 42x^4 + 3x^5 + 14x^6.$$

Компоненти модифікованого синдрому спотворень дорівнюють:

$$V_1=23, V_2=40, V_3=22, V_4=42, V_5=3, V_6=14.$$

7. Знаходять синдром помилок. Для цього з послідовності $V_1, V_2, \dots, V_r$ виділяють підпослідовність $V_j, V_{j+1}, \dots, V_r$, де $j=r-2t+1$, елементи якої є компонентами синдрому помилок: $D_1=V_j, D_2=V_{j+1}, \dots, D_{2t}=V_r$.

Оскільки $j=6-2\cdot 2+1=3$, то компонентами синдрому помилок ϵ : $D_1=V_3=22$, $D_2=V_4=42$, $D_3=V_5=3$, $D_4=V_6=14$.

8. Знаходять многочлен локаторів помилок у вигляді $\eta(x) = 1 + \sum_{j=1}^{\mu} \eta_j x^j$;

коефіцієнти η_j обчислюють на основі компонент D синдрому помилок способом Берлекемпа-Мессі [16]. Знаючи $D_1...D_4$ за цим способом знайдемо многочлен локаторів помилок: $\eta(x) = 1 + 45x + 40x^2$.

9. Розв'язують рівняння $\eta(x) = 0$ в полі $GF(P)$ та знаходять корені $x_1, x_2, \dots, x_{\mu}$, а на їх основі – локатори помилок: $L_{e_1}, L_{e_1}, \dots, L_{e_{\mu}}$.

Рівняння $1 + 45x + 40x^2$ в $GF(59)$ має корені $x_1=6$, $x_2=15$. Отже, локаторами помилок ϵ : $L_{e_1} = x_1^{-1} = 10$, $L_{e_2} = x_2^{-1} = 4$.

10. Знаходять многочлен значень спотворень $Q(x)$ степеня зі r співвідношення $V(x)\eta(x) \equiv Q(x) \pmod{x^{r+1}}$:

$$Q(x) = V(x)\eta(x) \pmod{x^7} = (1 + 23x + 40x^2 + 22x^3 + 42x^4 + 3x^5 + 14x^6) \cdot (1 + 45x + 40x^2) \pmod{x^7} = 36x^4 + 28x^3 + 53x^2 + 9x + 1.$$

11. Формують спільну множину $L=\{L_1, L_2, \dots, L_{\rho+\mu}\}$ локаторів спотворень, до якої входять локатори стирань (L_{ϵ}) та локатори помилок (L_e), впорядковуючи її за зростанням значень елементів, кількість яких становить $\rho+\mu$.

У нашому випадку

$$L = \{L_{e_2} = 4, L_{e_1} = 10, L_{\epsilon_1} = 32, L_{\epsilon_2} = 40\} = \{4, 10, 32, 40\}.$$

12. Обчислюють величини E_{γ} спотворень, тобто як стирань, так і помилок, за формулою Форні [16] $E_{\gamma} = \frac{Q(L_{\gamma}^{-1})}{\prod_{\gamma=1, j=1, \gamma \neq j}^{\rho+\mu} (1 - L_{\gamma}^{-1} L_j)}$.

Для елемента $L_1=4$ множини L знайдемо значення E_1 :

$$E_1 = \frac{Q(4^{-1})}{(1 - 4^{-1} \cdot 10)(1 - 4^{-1} \cdot 32)(1 - 4^{-1} \cdot 40)} = 30. \text{ За аналогією знаходимо значення } E$$

для решти елементів множини L : $E_2=28$, $E_3=41$, $E_4=23$.

13. Виправляють спотворення. Для кожної пари (L_{γ}, E_{γ}) подають L_{γ} у вигляді $L_{\gamma} = \beta^f$ (див. (5)) та виконують корекцію у розряді f прийнятого слова C' як $c'_f = (c'_f - E_{\gamma}) \pmod{P}$:

$$(L_1, E_1) = (4, 30) = (2^2, 30),$$

$$(L_2, E_2) = (10, 28) = (2^7, 28),$$

$$(L_3, E_3) = (32, 41) = (2^5, 41),$$

$$(L_4, E_4) = (40, 23) = (2^9, 23).$$

Зокрема,

$$c_2 = (c'_2 - E_1) \bmod 59 = (18 - 30) \bmod 59 = 47$$

$$c_7 = (c'_7 - E_2) \bmod 59 = (43 - 28) \bmod 59 = 15$$

$$c_5 = (c'_5 - E_3) \bmod 59 = (0 - 41) \bmod 59 = 18$$

$$c_9 = (c'_9 - E_4) \bmod 59 = (0 - 23) \bmod 59 = 36.$$

Отже, всі чотири спотворення у прийнятному слові C' (3) виправлено, внаслідок чого отримано кодове слово C (2).

Для надійного відтворення даних, що зберігаються у вигляді багатоколірного штрихкового зображення великої ємності, слід застосувати дворівневу систему забезпечення завадостійкості – на рівні ШК-знаків, коли мінімальними інформаційними одиницями є колірні елементи (чарунки), що утворюють ШК-знак, та на рівні ШК-позначки, коли мінімальними інформаційними одиницями є ШК-знаки.

На рівні ШК-знаків для забезпечення їх завадостійкості слід застосовувати многозначний код БЧХ з коректувальною здатністю $t=2$, а на рівні усієї ШК-позначки – коректувальний код Ріда-Соломона (рис. 3), який здатний виправляти спотворення двох видів – помилки і стирання.

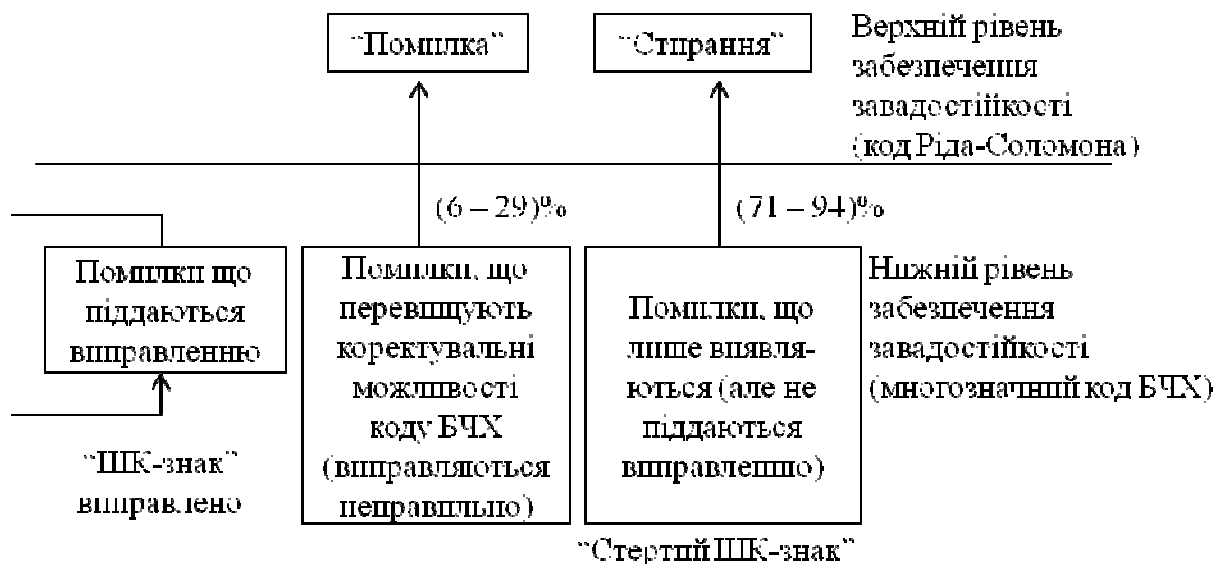


Рисунок 3 - Структура дворівневої системи забезпечення завадостійкості штрихкових зображень

Під час зчитування багатоколірного ШК програма послідовно виокремлює ШК-знаки зі штрихкодowego зображення формуючи таким чином слово коду Ріда-Соломона, в якому кожен ШК-знак є окремим розрядом слова. У виокремленому ШК-знаку працює програмний декодер коду БЧХ, результатом роботи якого можуть бути три висновки: «ШК-знак не ушкоджено» (цей випадок не показано на рис. 6), «ШК-знак виправлено», «Стертий ШК-знак».

Висновок «ШК-знак не ушкоджено» формують, якщо синдром помилки дорівнює нулю.

Рішення «ШК-знак виправлено» формують тоді, коли декодер коду БЧХ виправляє одно- або двократну помилку у векторі ШК-знака. Якщо ж ШК-знак містить три або більше ушкоджень, а декодер коду БЧХ сприймає їх як одно- або двократну помилку, і, відповідно, виправить її неправильно (а таких випадків, наприклад, для четвіркових кодів, - близько (6-29)%, то такий ШК-знак сприйматиметься декодером коду Ріда-Соломона як «помилка».

Рішення «Стертий ШК-знак» формується декодером коду БЧХ, якщо він виявить у ШК-знаку спотворення трьох або більше елементів. Для згаданих вище четвіркових кодів це матиме місце у (71 – 94)% випадків. Така ситуація кваліфікуватиметься декодером коду Ріда-Соломона як «стирання».

Відомо, що для виправлення кожної помилки у структурі кодового слова коду Ріда-Соломона мають бути передбачені два контрольні розряди, а для виявлення кожного стирання – один контрольний розряд. Тому, використання на нижньому рівні забезпечення завадостійкості багатоколірного ШК многозначного коду БЧХ, який, окрім виправлення одно- та двократних ушкоджень, дозволяє також виявляти понад 71% багатократних (три і більше) ушкоджень елементів у ШК-знаках, підсилює коректувальні можливості коду Ріда-Соломона за рахунок передачі на верхній рівень забезпечення завадостійкості ситуацій «стирання» замість ситуацій «помилка».

Нехай при створенні ШК-позначки багатоколірного ШК великої ємності (декілька тисяч ШК-знаків) для захисту даних застосовано лише верхній рівень забезпечення завадостійкості на основі коду Ріда-Соломона, причому ставиться вимога виправляти до 100 ушкоджених ШК-знаків. Для цього в коді Ріда-Соломона має бути передбачено 200 контрольних розрядів.

Відсоток багатократних помилок, які виявляються скороченими
четвірковими кодами БЧХ, похідними від (15, 9)-коду

Код БЧХ	Кратність помилки				
	3	4	5	6	7
(13, 7)-	79%	73%	71%	71%	71%
(12, 6)-	83%	78%	75%	75%	75%
(11, 5)-	88%	82%	79%	79%	79%
(10, 4)-	92%	86%	84%	83%	83%
(9, 3)-	94%	89%	87%	86%	86%

Якщо ж захист даних здійснювати на основі дворівневої системи забезпечення завадостійкості – на нижньому рівні застосовувати, наприклад, один з четвіркових кодів (табл. 3), а на верхньому рівні – код Ріда-Соломона, то зі ста можливих ушкоджених ШК-знаків приблизно 70 будуть ідентифіковані як «стертий ШК-знак» (тобто «Стирання»), а решта 30 – як «Помилка» (відповідно до статистичних даних з табл. 3). Для виправлення 70-ти стирань необхідно 70 контрольних розрядів, а для виправлення 30-ти помилок – 60 контрольних розрядів, отже, загалом 130 контрольних розрядів. Але оскільки в кодове слово коду Ріда-Соломона за умовою закладено 200 контрольних розрядів, то, отже, 70 контрольних розрядів можна «вивільнити». Ці «вивільнені» контрольні розряди дозволяють локалізувати та виправити додатково ще 35 ушкоджених ШК-знаків. Таким чином, можливості коду Ріда-Соломона будуть підсилені на $(135-100)/100=35\%$.

Звідси впливає й інший висновок. При дворівневій системі забезпечення завадостійкості штрихкодів даних у код Ріда-Соломона достатньо мати не 200, а лише $200-70=130$ контрольних розрядів, щоб забезпечити таку саму завадостійкість, і, отже, на 35% знизити надлишковість коду.

Висновки

У роботі вирішено актуальну наукову задачу підвищення завадостійкості багатоколірних штрихкодів зображень.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше запропоновано метод підвищення завадостійкості багатоколірних штрихових кодів, який ґрунтується на застосуванні дворівневого контролю помилок, що виникають при скануванні багатоколірного штрихкодів зображення, з використанням двох мнозначних коректувальних кодів: коду БЧХ – на рівні штрихкодів знаків (ниж-

ній рівень), та коду Ріда-Соломона – на рівні усієї штрихкової позначки (верхній рівень).

Особливістю застосування многозначного коректувального коду на нижньому рівні контролю помилок є те, що цифровий еквівалент (вектор) багатоколірного штрихкового знака має бути кодовим словом цього коректувального коду. Наділення ШК-знаків такою властивістю відбувається під час побудови (синтезу) символіки багатоколірного штрихового коду. Важливим при цьому є те, щоб коректувальний код нижнього рівня, крім виправлення помилок (відповідно до його коректувальної здатності), виявляв також частину багатократних помилок. Виконані авторами дослідження показали, що всі многозначні коди виявляють значну частину багатократних помилок, кратність яких перевищує коректувальну здатність коду. Причому, ця властивість має місце навіть у випадку повного коду, чого не спостерігається у двійкових кодах.

Наприклад, трійковий повний (8, 3)- код БЧХ забезпечує виявлення (34,4 – 46,4)% помилок кратності 3 – 7. Досліджено здатність виявляти (3 – 7)-кратні помилки для 23-х кодів БЧХ. Так, четвіркові коди БЧХ дозволять виявляти (71-94)% багатократних помилок, п'ятіркові – (70 – 96)%, а сімкові – (97 – 98)% помилок відповідно. Властивість виявляти багатократні помилки на нижньому рівні контролю (на рівні ШК-знаків) є визначальною, оскільки саме через цей параметр здійснюється зв'язок з верхнім рівнем контролю помилок.

Особливістю застосування многозначного коректувального коду на верхньому рівні контролю помилок є те, що він має виправляти спотворення двох видів – помилок та стирань. Таку властивість має код Ріда-Соломона. Факт виявлення помилки на нижньому рівні контролю сприймається кодом Ріда-Соломона як стирання. І саме за рахунок цього досягається ефект підвищення завадостійкості. Тому що, для виправлення стирання в коді Ріда-Соломона витрачається лише один контрольний розряд, а для виправлення помилки – два контрольні розряди. Це дає можливість істотно поліпшити захищеність цілісності штрихкодів даних. У разі застосування на нижньому рівні контролю помилок трійкових кодів БЧХ – на 45%, а при застосуванні четвіркових кодів БЧХ – на 35%.

Подальші дослідження доцільно зосередити на вдосконаленні механізму взаємодоповнювального застосування коректувальних кодів при дворівневому забезпеченні завадостійкості багатоколірних штрихкодів зображень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Elhami G. Three-Dimensional Cubic Barcodes / G. Elhami, A. Scholefield, M. Vetterli // IEEE Transactions on Image Processing. – 2022. – Vol. 31. – P. 3166 – 3181. DOI:10.1109/TIP.2021.3120049
2. Wang Q. Rain Bar: Robust Application-driven Visual Communication using Color Barcodes / Q. Wang, M. Zhou, K. Ren, T. Lei, J. Li, Z. Wang // 2015 IEEE 35th International Conference on Distributed Computing Systems: Columbus, Ohio, USA, June 29 – July 02, 2015: IEEE Proceedings. – 2015. – P. 537 – 546. DOI:10.1109/ICDCS.2015.61
3. Querini M. Reliability and Data Density in High Capacity Color Barcodes / M. Querini, G.F. Italiano // Computer Science and Information Systems. – 2014. – Vol. 11(4) . – P. 1595 – 1615. DOI:10 / 2298 / CSIS131218054Q
4. Firmani D. Engineering Color Barcode Algorithms for Mobile Applications / D. Firmani, G.F. Italiano, M. Querini // J. Gudmundsson, J. Katajainen. Experimental Algorithms, International Symposium on Experimental Algorithms SEA'2014. – Lecture Notes in Computer Science, Springer. – Vol. 8504. – P. 211 – 222. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07959-2-18>
5. Wara A. Enhancing user experience using mobile QR-code application / A.A. Wara, S. Dugga // International Journal of Computer and Information Technology. – 2014. – Vol. 3(6). – P.1310 – 1315.
6. Blasinski H. Color barcodes for mobile applications: a per channel framework / H. Blasinski, O. Bulan, G. Sharma // US Patent № US 9,111,186 B2. – 2015.
7. Jahagirdar K. QR Code with colored image / K. S. Jahagirdar, S. B. Borse // International Journal of Computer Applications. – 2015. – Vol. 115(16). – P. 38 – 41.
8. Parikh D. Localization and Segmentation of a 2D High Capacity Color Barcode / D.Parikh, G.Jancke // Workshop on Application of Computer Vision (WACV'08) : Copper Mountain, CO, USA, January 7 – 9, 2008 : IEEE proceedings.– 2008. –P. 1 – 6. DOI :<https://doi.org/10.1109/WACW.2008.4544033>
9. Grillo A. High capacity colored two dimensional codes / A. Grillo, A. Lentini, M. Querini, G. F. Italiano // International Multiconference on Computer Science and Information Technology : Wisla, Poland, October 18 – 20, 2010 : IEEE proceedings. – 2011. – P. 709 – 716. DOI: <https://doi.org/10.1109/IMCSIT.2010.5679869>
10. Ramya M. Color QR Codes for Real Time Applications with High Embedding Capacity / M. Ramya, M. Jayasheela // International Journal of Computer Application. – 2014. – Vol. 91(8). – P. 8 – 12. DOI : <https://doi.org/10.5120/15899-4889>

11. Abas A. Increasing data storage of colored QR code using compress, multiplexing and multilayered technique / A. Abas, Y. Yusof, R. Din, F. Azali, B. Osman // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2020. – Vol. 9(6). – P. 2555 – 2561.

DOI: <https://doi.org/10.11591/eei.v9i6.2481>

12. Жураковський Б. Ю. Багатовимірні штрихові коди / Б.Ю. Жураковський, В.А. Дружинін // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління». – 2018. – № 2(33). – С. 15 – 31.

DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.33.2018.164669>

13. Berchtold W. JAB Code – A Versatile Polychrome 2D Barcode / W. Berchtold, H. Liu, M. Steinebach, D. Klein, T. Senger, N. Thence // Electronic Imaging. – 2020. – Vol. 2020(3). – P. 207 – 212.

DOI: <https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2020.3.MOBMU-207>

14. Wang G. Security Mechanism Improvement for 2D Barcodes using Error Correction with Random Segmentation / Wang G., Yang Z., Chen J. // The 6th International Conference on Information Technology: IoT and Smart City: Bhubaneswar, India, December 19 – 21, 2018 : Proceedings. – IEEE, 2018. – P. 104 – 109.

DOI: <https://doi.org/10.1145/3301551.3301593>.

15. Сулема Є. С. Алгоритмічне забезпечення завадостійкості багатоколірних штрихкодів на основі поля $GF(p)$ / Є. С. Сулема, М. В. Онай, А. І. Дичка // Наукові вісті КПІ. – 2021. – № 1(132). – С. 50 – 62.

DOI : <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.1.231210>

16. Blahut R. Theory and Practice of Error Control Codes / R. E. Blahut // Addison – Wesley, 1983. – 576 P.

REFERENCES

1. Elhami G. Three-Dimensional Cubic Barcodes / G. Elhami, A. Scholefield, M. Vetterli // IEEE Transactions on Image Processing. – 2022. – Vol. 31. – P. 3166 – 3181.

DOI:10.1109/TIP.2021.3120049

2. Wang Q. Rain Bar: Robust Application-driven Visual Communication using Color Barcodes / Q. Wang, M. Zhou, K. Ren, T. Lei, J. Li, Z. Wang // 2015 IEEE 35th International Conference on Distributed Computing Systems: Columbus, Ohio, USA, June 29 – July 02, 2015: IEEE Proceedings. – 2015. – P. 537 – 546.

DOI:10.1109/ICDCS.2015.61

3. Querini M. Reliability and Data Density in High Capacity Color Barcodes / M. Querini, G.F. Italiano // Computer Science and Information Systems. – 2014. – Vol. 11(4) . – P. 1595 – 1615. DOI:10/2298/CSIS131218054Q

4. Firmani D. Engineering Color Barcode Algorithms for Mobile Applications / D. Firmani, G.F. Italiano, M. Querini // J. Gudmundsson, J. Katajainen. Experimental Algorithms, International Symposium on Experimental Algorithms SEA'2014. – Lecture Notes in Computer Science, Springer. – Vol. 8504. – P. 211 – 222.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07959-2-18>
5. Wara A. Enhancing user experience using mobile QR-code application / A.A. Wara, S. Dugga // International Journal of Computer and Information Technology. – 2014. – Vol. 3(6). – P. 1310 – 1315.
6. Blasinski H. Color barcodes for mobile applications: a per channel framework / H. Blasinski, O. Bulan, G. Sharma // US Patent № US 9,111,186 B2. – 2015.
7. Jahagirdar K. QR Code with colored image /K. S. Jahagirdar, S. B. Borse // International Journal of Computer Applications. – 2015. – Vol. 115(16). – P. 38 – 41.
8. Parikh D. Localization and Segmentation of a 2D High Capacity Color Barcode / D. Parikh, G. Jancke // Workshop on Application of Computer Vision (WACV'08) : Copper Mountain, CO, USA, January 7-9, 2008 : IEEE proceedings. – 2008. – P. 1 – 6.
DOI :<https://doi.org/10.1109/WACV.2008.4544033>
9. Grillo A. High capacity colored two dimensional codes / A. Grillo, A. Lentini, M. Querini, G. F. Italiano // International Multiconference on Computer Science and Information Technology : Wisla, Poland, October 18 – 20, 2010 : IEEE proceedings. – 2011. – P. 709 – 716.
DOI : <https://doi.org/10.1109/IMCSIT.2010.5679869>
10. Ramya M. Color QR Codes for Real Time Applications with High Embedding Capacity / M. Ramya, M. Jayasheela // International Journal of Computer Application. – 2014. – Vol. 91(8). – P. 8 – 12. DOI : <https://doi.org/10.5120/15899-4889>
11. Abas A. Increasing data storage of colored QR code using compress, multiplexing and multilayered technique / A. Abas, Y. Yusof, R. Din, F. Azali, B. Osman // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2020. – Vol. 9(6). – P. 2555 – 2561.
DOI: <https://doi.org/10.11591/eei.v9i6.2481>
12. Zhurakovskiy B. Multidimensional Barcodes / B.Yu. Zhurakovskiy, V.A. Druzhynin // Mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk “Adaptyvni systemy avtomatychnoho upravlinnya”. – 2018. – Vol. 2(33). – P. 15 – 31.
DOI: <https://doi.org/10.20535/1560-8956.33.2018.164669>
13. Berchtold W. JAB Code – A Versatile Polychrome 2D Barcode / W. Berchtold, H. Liu, M. Steinebach, D. Klein, T. Senger, N. Thence // Electronic Imaging. – 2020. – Vol. 2020(3). – P. 207 – 212.
DOI : <https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2020.3.MOBMU-207>

14. Wang G. Security Mechanism Improvement for 2D Barcodes using Error Correction with Random Segmentation / Wang G., Yang Z., Chen J. // The 6th International Conference on Information Technology: IoT and Smart City: Bhubaneswar, India, December 19 – 21, 2018 : Proceedings. – IEEE, 2018. – P. 104 – 109.

DOI : <https://doi.org/10.1145/3301551.3301593>.

15. Sulema Ye. Algorithmic Provision of Interference-Resistance of Multicolor Barcode Patterns on the Base of GF(p) / Ye.S. Sulema, M.V. Onay, A.I. Dychka // Naukovisti KPI. – 2021. – Vol. 1(132). – P. 50 – 62.

DOI : <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.1.231210>

16. Blahut R. Theory and Practice of Error Control Codes / R. E. Blahut // Addison – Wesley, 1983. – 576 P.

Received 01.03.2023.

Accepted 03.03.2023.

Improving the interference resistance of multi-color barcode images

A method of improving the interference resistance of multi-color barcodes is proposed, which is based on the application of two-level control of errors that occur when scanning a multi-color barcode image, using two multi-valued correcting codes: the BCH code - at the level of barcode patterns (lower level), and the Reed-Solomon code - at barcode symbol level (top level).

The proposed method makes it possible to create multi-color barcodes with improved immunity characteristics, which ensure reliable reproduction of data during scanning of large-capacity multi-color barcode images in automatic identification systems.

Сулема Євгенія Станіславівна – д.т.н., доцент, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Дичка Андрій Іванович – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Yevgeniya Sulema – DSc, Associate Professor, Head of the Computer Systems Software Department of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

Andrii Dychka – PhD student of the Computer Systems Software Department of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

В.У. Ігнаткін, В.С. Дудніков, Т.Р. Лучишин, С.В. Алексеєнко,

О.П. Юшкевич, Т.П. Карпова, Т.С. Хохлова, Ю.С. Хомош, В.А. Тіхонов

**МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ПРАВИЛЬНОСТІ ВИБОРУ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ
ВИКОРИСТАННЯ ЗА ВИЗНАЧЕНИМ КРИТЕРІЄМ ЗАСОБІВ
СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА КОНТРОЛЮ ОБ'ЄКТІВ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Анотація. Інформаційний підхід до вирішення задач спостережень та контролю до теперішнього часу, не використовується. В основі теорії вимірювань лежить поняття про ентропію випадкових величин - як міри їх невизначеності (множини сукупностей їх можливих значень). Чим більше значень може приймати дискретна випадкова величина, чи чим більший діапазон безперервної випадкової величини, тим – більша їх ентропія. Кількість інформації, яка одержується при вимірюванні, контролі, дослідженні відповідає зменшенню ентропії від значення, котре характеризує невизначеність, яка залишається після одержання результату вимірювання деяких параметрів об'єктів, явищ тощо. Говориться про зв'язок точності, енерговитрат та швидкодії засобів вимірювальної техніки. Висвітлені питання визначення порогу гранично можливої точності вимірювань фактичних величин, а також одержання узагальнюючих інформаційно-енергетичних співвідношень, які дозволяють оптимізувати процедуру вибору основних показників якості засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). При цьому, роблячи спробу все точніше визначити значення вимірювальної величини, ми на деякому етапі неминуче зіткнемося з принциповою неможливістю подальшого їх уточнення, яке пов'язано, у кінцевому рахунку, з фізично можливим ступенем визначеності (на відміну від ентропії, яка характеризує невизначеність, і яка зветься нехентропією) будь якої вимірювальної величини, яка обумовлена чи її особистою дискретністю (наприклад, при вимірюванні числа атомів будь-якої речовини у суміші безглуздо говорити про точність підрахунку, яке дорівнює 0,1 чи 0,01 атому) чи її тепловими (молекулярними) флуктуаціями. Ця межа визначеності у мікросвіті відомий як «Правило невизначеності Гейзенберга». У статті запропоновано модель оцінювання та ефективного використання спостереження та контролю об'єктів різної природи. Запропоновано "інформаційний підхід" до вирішення задач вибору та використання засобів вимірювальної техніки в умовах переходу від традиційних метрологічних показників точності ЗВТ до інформаційних. Приведено приклад вибору ЗВТ і кількості вимірів цим ЗВТ. Ключові слова: модель, інформація, ефективність, невизначеність, випадкова величина

© Ігнаткін В.У., Дудніков В.С., Лучишин Т.Р., Алексеєнко С.В.,

Юшкевич О.П., Карпова Т.П., Хохлова Т.С., Хомош Ю.С., Тіхонов В.А., 2023

Постановка задачі

Розробити модель оцінювання правильності вибору та ефективного використання (за визначеним критерієм) засобів вимірювальної техніки.

Викладення основного матеріалу

Деякі елементи інформаційної теорії вимірів

Інформаційні підходи до вирішення загальних проблем вимірювань та вдосконалення вимірювальної техніки, розвинені в 60-70-х роках у роботах вчених Л. Бріллюена, Новицького П.В, Темнікова Ф.Є., Цапенко М.П., Глушкова В.М. і інших [1-13], до теперішнього часу в метрологічній практиці, по суті, не використовуються. Це пояснюється тим, що в ході дослідження і практичного випробування не виявилось скільки-небудь помітних переваг інформаційних підходів, заради яких варто було б ламати традиції, що склалися. Проте вони представляють безперечний інтерес як один із можливих напрямів оцінок узагальнених характеристик якості вимірювальної інформації та технічних засобів її одержання.

В основі інформаційної теорії вимірів лежить поняття про ентропію випадкової величини, як заходи її невизначеності (множинної сукупності її можливих значень) Чим більше - значень може приймати дискретна випадкова величина або чим більше діапазон безперервної випадкової величини, тим більше - їх ентропія [14].

Згідно з К. Шенноном, ентропія H дискретної випадкової величини X' , яка може набувати n значення ($i = 1, 2, \dots, n$) з відповідними ймовірностями P_i , виражається як

$$H(X') = - \sum_{i=1}^n P_i \log P_i. \quad (1)$$

Ентропія безперервної випадкової величини X , яка має щільність розподілу $p(x)$, визначається співвідношенням

$$H(X) = - \int_{x_n}^{x_v} p(x) \log p(x) dx, \quad (2)$$

де x_n, x_v — нижня та верхня межі діапазону значень величини X .

Залежно від вибору основи логарифму у формулах (1) і (2) ентропія може виражатися в дитах (при використанні десяткових логарифмів), у бітах (для двійкових логарифмів) або в нитах (для натуральних логарифмів).

Відповідно до загальних положень теорії інформації, запропонованих і обґрунтованих К. Шенноном, кількість інформації q , що отримується при вимі-

рюванні X (або X'), дорівнює різниці апіорної (до вимірювань) $H(X)$ і апостеріорної (після отримання результату вимірювань – x_p) – $H(X/x_p)$ ентропії цієї (вимірюваної) величини, тобто.

$$q = H(X) - H(X/x_p). \quad (3)$$

Отже, кількість інформації, одержуваної при вимірі, відповідає зменшенню ентропії від значення $H(X)$, яке характеризує невизначеність вимірюваної величини перед вимірюванням, до значення $H(X/x_p)$, яке характеризує решту після отримання результату x_p невизначеність.

Тобто, у разі (з загальних позицій теорії інформації) вимір може трактуватися як „скорочення області невизначеності вимірюваної величини”.

Величину $H(X/x_p)$ називають умовною ентропією (за умови, що отримано x_p).

Нехай до проведення вимірювань було відомо, що величина X , що вимірюється, може приймати значення в діапазоні від x_n до x_v (наприклад, робочий діапазон показань вимірювального приладу) і ймовірність значень X в цьому діапазоні однакова, тобто

$$p(x) = \frac{1}{x_v - x_n}.$$

Тоді відповідно до формули (2) вихідна (апіорна) ентропія дорівнюватиме

$$H(X) = - \int_{x_n}^{x_v} \frac{1}{x_v - x_n} \log \frac{1}{x_v - x_n} dx = \log(x_v - x_n). \quad (4)$$

Після проведення вимірювання та отримання результату x_p ми можемо стверджувати, що вимірювана величина (її дійсне значення) лежить у межах від $x_p - \Delta_n$ до $x_p + \Delta_v$, де Δ_n , Δ_v – нижня та верхня межі похибки вимірювання Δ . Приймемо (для наочності висновків), що похибка лежить у межах $\pm \Delta$ і щільність розподілу значень –

$$p(\Delta) = \frac{1}{2\Delta}.$$

Тоді умовна ентропія, що залишилася після отримання результату x_p , дорівнюватиме:

$$H(X/X_p) = \int_{x_p - \Delta}^{x_p + \Delta} \frac{1}{2\Delta} \log \frac{1}{2\Delta} dx = \log 2\Delta. \quad (5)$$

Отже, отримана при вимірюванні кількість інформації, на підставі формули (3), складе

$$q = \log(X_B - X_H) - \log 2\Delta = -\log \frac{2\Delta}{X_B - X_H}. \quad (6)$$

Тобто кількість інформації, отримана при вимірюванні, дорівнює негативному значенню логарифму наведеної до діапазону вимірювань похибки їх результату.

У заміні операції поділу Δ на $(X_B - X_H)$, що використовується при визначенні привід денної похибки, на операцію віднімання вихідної і невизначеної, що залишилася, ^ характеризуються відповідними значеннями ентропії, і полягає основ-; ний прийом аналізу інформаційної теорії вимірів.

Неважко показати, що умовна ентропія величини, що підкоряється нормальному розподілу із щільністю $P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$ дорівнює

$$H_H(X / X_P) = \log(\sqrt{2\pi} \sigma). \quad (7)$$

Як видно з порівняння формул (5) та (7) умовна ентропія для нормального розподілу похибки відрізняється від умовної ентропії рівномірного розподілу лише твором, що стоїть під знаком логарифму. Звідси випливає висновок про те, що з інформаційної точки зору, результат, що має нормальний випадок похибки, дасть таку ж кількість інформації, як і результат з рівномірним розподілом похибки, якщо тільки $2\Delta = \sqrt{2\pi} \sigma$. При цьому дисперсія рівномірного розподілу на порядок перевищує дисперсію нормального розподілу.

Зазначене дозволяє ввести поняття про якусь узагальнену характеристику точності вимірювань (і засобів вимірювань) — ентропійну похибку. При цьому ентропійною похибкою вважається похибка з рівномірним розподілом, яка вносить таку ж дезінформаційну дію (забезпечує таку ж остаточну невизначеність), як і похибка з цим (реальним) законом розподілу.

Математично ентропійне значення похибки, що визначається як половина інтервалу невизначеності, виражається так:

$$\Delta_e = \frac{1}{2} e^{H(X/X_P)}. \quad (8)$$

Залежність між ентропійним і середнім квадратичним значеннями похибки може бути представлена як $\Delta_e = K_e \sigma$, де коефіцієнт $K_e = \frac{\Delta_e}{\sigma}$, що залежить від виду закону розподілу похибки, називається його ентропійним коефіцієнтом.

Найбільшою ентропією при заданому значенні має нормальний розподіл. Тому він має найбільший, гранично можливий ентропійний коефіцієнт, рів-

ний виходячи з співвідношень (7) і (8) (для натуральних логарифмів):

$$K_{ch} = \sqrt{\frac{\pi e}{2}} = 2,07.$$

Саме тому досить часто в невизначеній ситуації (за відсутності доступу до даних) як модель розподілу похибки при заданій дисперсії приймається нормальний розподіл.

Для рівномірного розподілу $\sigma = \Delta\sqrt{3}$, та $K_{ch} = \sqrt{3} \approx 1,73$.

Аналогічним чином можуть бути обчислені значення K_{ch} для будь-яких інших законів розподілу.

Зв'язок точності, енергоспоживання та швидкодії засобів вимірювань. Це питання, досить повно розроблене в рамках інформаційної теорії вимірювань, має, мабуть, на сьогоднішній день найбільш істотне значення для приладу та практики. Практично важливими результатами його рішення є по-перше, визначення порога гранично можливої точності вимірювання фактичних величин і, по-друге, отримання узагальнених інформаційно-енергетичних співвідношень, що дозволяють оптимізувати процедуру вибору основних показників якості засобів вимірювання.

Намагаючись все точніше і точніше визначити значення вимірюваної величини, ми на якомусь етапі неминуче зіткнемося з принциповою неможливістю подальшого його уточнення. Це пов'язано зрештою з фізично можливим ступенем певності (на відміну від ентропії, що характеризує невизначеність, званої нехентропією) будь-якої вимірюваної величини, обумовленої або її власною дискретністю (наприклад, при вимірюванні числа атомів будь-якої речовини в суміші без свідомо говорити про точність відліку, що дорівнює 0,1 або 0.01 атома), або її тепловими (молекулярними) флуктуаціями.

Ця межа визначеності в мікросвіті відома як „правило невизначеності Гейзенберга”.

Енергія термодинамічної флуктуації молекулярних явищ визначається рівнянням Найквіста

$$N_{ш} = 4K\theta\Delta f, \quad (9)$$

де $N_{ш}$ - потужність теплових флуктуацій; $K \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж*К⁻¹ - постійна Больцмана; θ - абсолютна температура; Δf - смуга частот випадкових флуктуацій, до якої належить знайдена потужність.

Якщо за час (t) буде вироблено (n) окремих відліків вимірюваної величини, то потужність флуктуацій середнього значення буде зменшуватися обернено пропорційно числу n , тобто. буде рівна

$$\overline{N_u} = \frac{4K\theta\Delta f}{n}.$$

Однак таке зменшення потужності флуктуаційних перешкод відбуватиметься лише до тих пір, поки відліки, що усереднюються, незалежні один від одного. Відповідно до теорії Котельникова [17,18], число незалежних відліків випадкової функції з граничною частотою Δf за час (t) дорівнює $n=2\Delta ft$.

Тоді максимально можливе зменшення потужності флуктуаційної перешкоди при усередненні за час t визначиться виразом

$$\overline{N_{u\min}} = \frac{4K\theta\Delta f}{2\Delta ft} = \frac{2K\theta}{t}. \quad (10)$$

Як відомо, тепловий шум підпорядковується нормальному закону з дисперсією $\sigma_u^2 = N_u$.

Отже, мінімальна відносна (віднесена до робочого діапазону)

і середня квадратична похибка результату вимірювань, обумовлена тепловими флуктуаціями вимірюваної величини, дорівнюватиме:

$$\delta_{u\min} = \sqrt{\frac{N_{u\min}}{N}} = \sqrt{\frac{2K\theta}{N_t}} \quad (11)$$

та відносна ентропійна похибка:

$$\delta_{e\min} = \sqrt{\frac{2\pi e}{2}} * \sqrt{\frac{2K\theta}{N_t}}, \quad (12)$$

де N – повна потужність несучого процесу (потужність, що відбирається засобом вимірювань від об'єкта, що вимірюється).

Співвідношення (11) і (12), справедливі для будь-яких вимірюваних величин, будь-яких процесів та засобів вимірювань, визначають вихідну оптимального класу точності нехентропію вимірюваної фізичної величини при відмінній від абсолютного нуля температурі та гранично можливу точність її виміру.

Теплові перешкоди залежать від значень вимірюваної величини, тобто. є суто адитивними. За цих умов максимальна кількість інформації (у дитах), яка може містити вимірювальний сигнал з енергією N_t , на підставі формули (6) дорівнює

$$q_{\max} = \lg \frac{1}{2} \sqrt{\frac{N_t}{\pi e K \theta}}. \quad (13)$$

Логарифмуючи всі постійні величини (π , e , k), що входять до формули (13). отримаємо остаточну залежність між кількістю інформації в дитах, енергія в джоулях і абсолютною температурою в Кельвінах:

$$q_{\max} = 10,66 + \frac{1}{2} \lg \frac{N_t}{\theta}. \quad (14)$$

Основне значення співвідношення полягає в наступному. Передача інформації від одного об'єкта до іншого, наприклад від об'єкта вимірювань до вимірювального пристрою, може відбуватися тільки шляхом їхньої енергетичної взаємодії. При відсутності обміну енергією між об'єктами ЗВТ передача інформації, а отже і вимір – неможливі.

При збільшенні енергетичного обміну зростає і можливість отримання більшої інформації, а при заданому значенні енергетичного обміну обмежена кількість отриманої та переданої інформації.

Реальна точність засобів вимірювань, обумовлена їх власними властивостями, у всіх випадках буде меншою, ніж характеризується мінімально можливою ентропійною похибкою $\delta_{e\min}$. Тому, як показник «метрологічної досконалості» засобів вимірювань, можна ввести відношення $\alpha = \frac{\delta_e}{\delta_{e\min}}$, де δ_e – реальне ентропійне значення похибки засобів вимірювань, яке називається показником втрати точності.

Величину $\eta_e = \frac{1}{\alpha^2}$, яка означає відносну частину корисної використаної енергії, яка відібрана від об'єкту, називають енергетичним ККД засобів вимірювання

Поряд з цими показниками, що характеризують досконалість використовуваної вимірювальної апаратури, інформаційна теорія вводить і показник інформаційної досконалості самого процесу вимірювання. Як такий показник використовується відношення кількості інформації q , реально одержуваного в результаті вимірювання, до межі кількості інформації $q_{\max}$ обмеженого тепловими флуктуаціями вимірюваної величини при заданих умовах вимірювань (абсолютної температурі середовища θ , тобто, показник:

$$\eta_n = \frac{q}{q_{\max}}.$$

Цей показник отримав назву інформаційного ККД процесу виміру.

Звивши воєдино розглянуті показники, на підставі (12) отримаємо загальне співвідношення, що зв'язує точність δ_e , енергоспоживання та швидкодію т засобів вимірювання:

$$\delta_e^2 N_t = \frac{w_{ш}}{\eta_e}, \quad (15)$$

де $w_{ш} = K\theta \pi e$ - енергія теплового шуму при абсолютній температурі θ (наприклад, при нормальній температурі $\theta = 293^\circ\text{K}$ та $w_{ш} = \pi * 1,38 * 10^{-23} * 293 = 3,5 * 10^{-20} [\text{Дж}]$).

Як видно із співвідношення (15), вдосконалення засобів вимірювань за яким-небудь із показників (точності, енергоспоживання або швидкодії) можливе лише за рахунок підвищення їх енергетичного ККД або за рахунок зниження (погіршення) інших показників. Останній випадок є більш типовим, оскільки підвищення енергетичного ККД приладів (як і ККД будь-яких досить досконалих енергетичних систем) дуже складно.

Такими є деякі елементи інформаційної теорії вимірювань та вимірювальних пристроїв, знання яких необхідне, на наш погляд, сучасному метрологу хоча б для орієнтації у складних дискусійних питаннях метрологічної теорії і практики.

Модель оцінювання правильності вибору та ефективного використання засобів вимірювальної техніки (ЗВТ)

Для обґрунтування оптимальної кількості вимірювань та вибору ЗВТ, що забезпечують необхідну точність, характеристики надійності, мінімальні витрати на вимірювання параметрів якості продукції та робочих ЗВТ, необхідно математично описати процес вимірювань, розробити критерії оцінок цього процесу [15-17].

Математично процес вимірів можна описати наступним чином. Виконується Z вимірювань одного й того ж контрольованого параметра β , в результаті чого виходить ряд значень $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_z$.

Дійсне значення параметру знаходиться в межах :

$$\beta_{cp} - \Delta \leq \beta \leq \beta_{cp} + \Delta, \quad (16)$$

з довірчою ймовірністю P' . Довірчий інтервал Δ , пов'язаний з кількістю вимірювань Z та довірчою ймовірністю P' наступним чином:

$$\Delta = \frac{\sigma' t_p}{\sqrt{z-1}}, \quad (17)$$

де σ' - середнє квадратичне відхилення похибки вимірювання; t_p - параметр, який залежить від виду закону розподілу похибки вимірювань: P' та Z .

Таким чином, за результатами вимірювань неможливо визначити дійсне значення параметра β , а можна лише вказати інтервал, в якому з певною ймовірністю P' воно знаходиться.

Нехай необхідно забезпечити довірчий інтервал Δ з довірчою ймовірністю P' , тоді можна запропонувати ряд ЗВТ із середніми квадратичними відхиленнями: $\sigma'_1, \sigma'_2, \dots, \sigma'_i$, яким будуть відповідати кількості вимірювань $Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots$

Цікаво визначити клас точності ЗВТ, що задовольняє цим вимогам Δ , P' деяким оптимальним чином. Припустимо, що критерієм оптимальності вимірювань прийнята питома інформація:

$$h_1 = \frac{I}{z} \left[\frac{\text{бит}}{\text{вим.}} \right], \quad (18)$$

де $I = \int_{-\infty}^{\infty} \log_2 [f(t)] f(t) dt - \log_2 \Delta$ - кількість інформації для різних законів розподілу

ділу під час вимірювання параметра β (табл. 1);

$f(t)$ - щільність розподілу похибки вимірювань.

Таблиця 1

Кількість інформації для різних законів розподілу

Закон розподілу похибок	Щільність розподілу похибки	Інформація про вимірювальний параметр β
Нормальний	$\left(\frac{1}{\sigma'}\sqrt{2\pi}\right)e^{\frac{-t^2}{2\sigma'^2}}$	$\log_2\left(\sqrt{2\pi}e\frac{\sigma'}{\Delta}\right)$
Рівномірний	$\frac{1}{b-a}$	$\log_2\frac{b-a}{\Delta}$

Назвемо показник h_1 інформаційною ефективністю вимірювань. Оптимальному класу точності ЗВТ буде відповідати максимальне значення інформаційної ефективності. Для заданих значень t_p , Z , P' розраховані за допомогою ЕОМ значення функції h_1 та побудовані графіки, які надані на рис. 1-4, котрі дозволяють вибирати оптимальні по h_1 кількості вимірів та відносний довірчий проміжок $\frac{\Delta}{\sigma'}$ для заданих значень P' .

Продемонструємо сказане на прикладі.

Приклад. В ГОСТ 8.051-81 встановлено, що для розмірів від 360 мм до 500 мм (квалітет 1) допустима похибка виготовлення дорівнює 10 мкм, допустима похибка вимірювань складає 3,5 мкм з коефіцієнтом надійності $P'=95\%$. По рис. 4 вибираємо оптимальну (максимум h_1 для $P'=95\%$) кількість вимірів Z дорівнює 5. Далі по рис. 3 вибираємо $\frac{\Delta}{\sigma'}$ і воно дорівнює 1,388. Звідси

$$\sigma' = \frac{\Delta}{1,388} \approx 2,52 \text{ мкм}$$

Таким чином для номінальних розмірів від 360 мм до 500 мм, здопустимою похибкою 3,5 мкм і $P' = 95\%$ слід вибрати клас точності ЗВТ з $\sigma' = 2,52$ мкм і зробити 5 вимірів. При цьому вимір буде проведено найефективніше (у сенсі h_1).

Зазвичай, при проведенні перевірок ЗВТ їхня похибка оцінюється в декількох точках діапазону вимірювань. Звичайно, що ЗВТ слід повірити тільки в тих точках діапазону, в яких є суттєва ймовірність виходу похибки ЗВТ з поля допуску. Якщо похибка ЗВТ в одній точці діапазону оказалась у межах допусків, то друга точка для повірки повинна бути обрана так, щоб кумулятивна ймовірність виходу погрешності за допуск виявилася в ній більшою за встановлену.

У процесі вимірювання беруть участь оператор та ЗВТ. Аналіз інформаційної ефективності вимірювань показує, що ЗВТ ефективно при кількостях вимірів, великих або рівних двом, наприклад, при довірчій ймовірності $P'=0,95$; $Z = 5$. Тобто ми стикаємося з фактом, що ефективно (в сенсі h_1) використання ЗВТ призводить до збільшення тривалості з вимірювання та неефективної роботи операторів. Тому представляється цікавим визначення такої кількості вимірювань, яка призводить до ефективного використання ЗВТ і достатньо задовільної роботи операторів. Для цього збудуємо наступну цільову функцію:

$$Ц = c_{\text{вим}} z + c_{\text{ЗВТ}}(100 - h_1), \quad (19)$$

де $c_{\text{вим}}$ - вартість вимірювань без вартості ЗВТ; Z — кількість вимірів; $c_{\text{ЗВТ}}$ - вартість ЗВТ; h_1 - інформаційна ефективність вимірювань, %.

Визначимо оптимальну кількість вимірювань, мінімізуючи цю цільову функцію. Для цього візьмемо похідну від $Ц$ по Z і прирівняємо її до нуля. В результаті ряду нескладних перетворень отримаємо рівняння, з якого можна визначити $Z_{\text{опт}}$

$$\frac{dh_1}{dZ} = \frac{1}{2 \ln 2 Z_{\text{опт}} (Z_{\text{опт}} - 1)} - \log_2(\sqrt{2\pi e / t_p}) + \log_2 \sqrt{Z_{\text{опт}} - 1}. \quad (20)$$

За допомогою ЕОМ для ряду значень $P'(99,9; 99; 95; 90; 50; 10\%)$ та $Z(2, 3, \dots, 10)$ можна визначити значення функції. Результати розрахунків

подано у вигляді графіка (рис. 5). З аналізу цього графіка видно, що з $P'=90; 95; 99; 99,9\%$ рівняння (20) має рішення лише у заштрихованій області (див. рис. 5). Крім того, при $P = 10 \dots 50\%$ функція h_1 досягає свого найбільшого значення при $Z = 2$, а при $P = 90 \dots 99,9\%$ ми стикаємося з обставиною, що заштрихованої області оптимальних кіл вимірів відповідає область негативних значень інформації, що визначається за формулою.

$$I = \log_2(\sqrt{2\pi e} \frac{\sqrt{z-1}}{t_p}) = 2,05 + \log_2(\frac{\sqrt{z-1}}{t_p}). \quad (21)$$

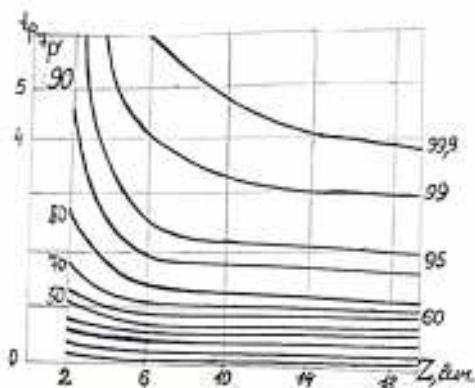


Рисунок 1 – Залежність параметру t_p від кількості вимірів Z при різних значеннях довірчої ймовірності P'

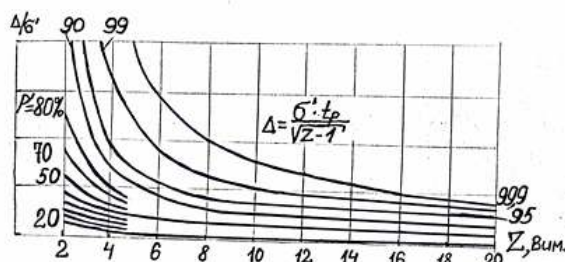


Рисунок 3 – Залежність відносної точності вимірювань $\frac{\Delta}{\sigma}$ від кількості вимірювань Z при різних значеннях довірчої ймовірності P'

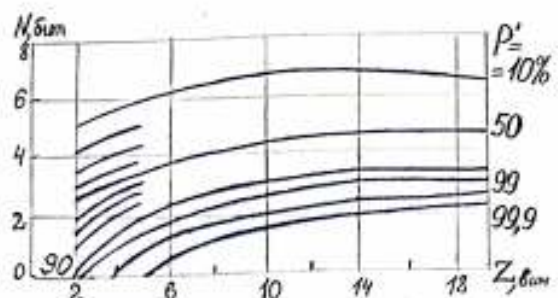


Рисунок 2 – Залежність кількості інформації N від кількості вимірювань Z при різних значеннях довірчої ймовірності P'

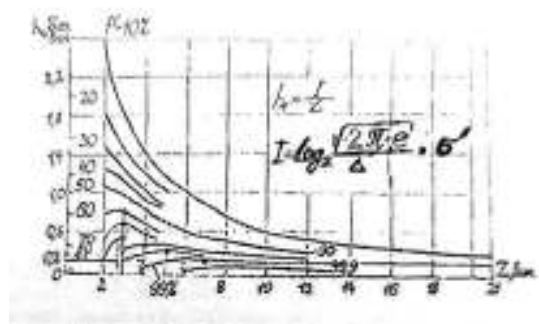


Рисунок 4 – Залежність щільної інформації h_1 від кількості вимірювань Z при різних значеннях довірчої ймовірності P'

Це викликано тим, що ми не диференційовано підійшли до вибору формули для інформації при різних P' . Цей недолік можна усунути, визначивши інформацію за формулою

$$I = C(P') + \log_2 \left(\frac{\sqrt{Z-1}}{t_p} \right). \quad (22)$$

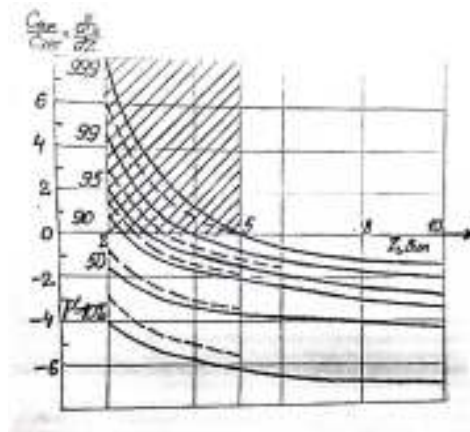


Рисунок 5 – Залежність відношення вартості вимірювань $C_{\text{вим}}$ до вартості ЗВТ $C_{\text{ЗВТ}}$ від кількості вимірювань Z при різних значеннях довірчої вірогідності P'

Перехід від формули (21) до (22) викликаний тим, що при перевірках ми отримуємо інформацію про ЗВТ, і кількість інформації, що отримується при цьому, має бути позитивною. У результаті отримуємо $C(P') = \log_2 t_p$ і відповідну таблицю для уточнених параметрів за різних P' (табл. 2).

Рівняння (20) приймає вигляд:

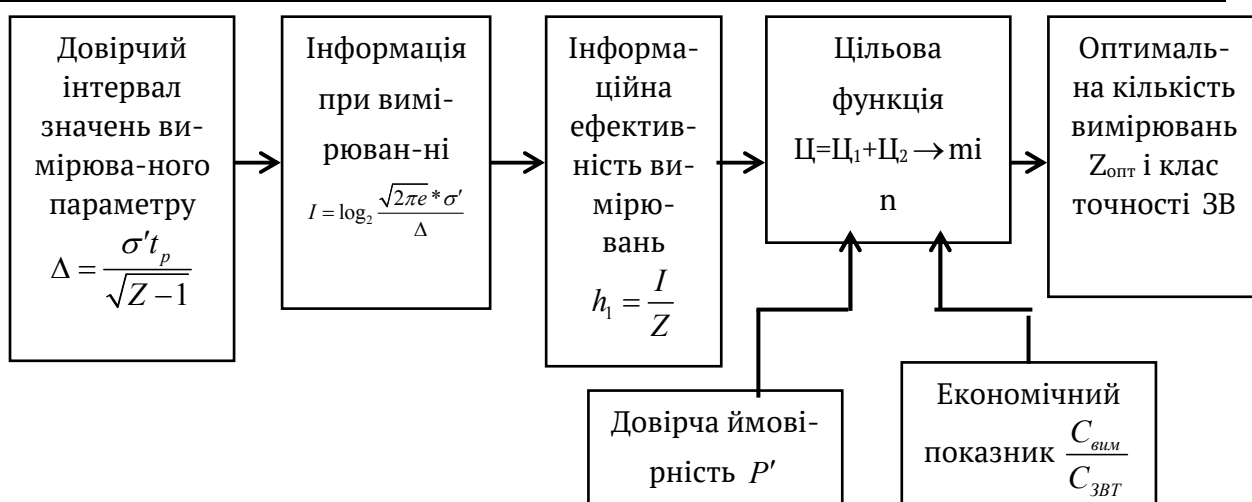
$$\frac{dh_1}{dZ} = \left(\frac{C_{\text{вим}}}{C_{\text{ЗВТ}}} \right) - \left[\frac{C(P')}{Z^2} \right]. \quad (23)$$

На рис 5 пунктиром нанесені графіки функцій, що дозволяють більш ґрунтовано визначати. Отримані залежності, представлені на графіках (рис.5 та рис.3), дозволяють, задаючись значеннями $\frac{C_{\text{вим}}}{C_{\text{ЗВТ}}}$, (P') та (Δ) ,

визначати оптимальну кількість вимірювань $Z_{\text{опт}}$ та клас точності ЗВТ (рис. 6), а отже, оцінювати правильність вибору та ефективного використання ЗВТ відповідно до прийнятого інформаційного критерія. Слід зазначити, що розглянутий у цьому розділі «інформаційний підхід» до вирішення завдань вибору та використання ЗВТ може бути використаний в умовах однозначного переходу від традиційних метрологічних показників до інформаційних.

Уточнені параметри за різних P'

P', %	I*	h_1^*	$\frac{dh_1^*}{dZ}$
10	I-4,71	$h_1 = \frac{4,71}{Z}$	$\frac{C_{вим}}{C_{ЗВТ}} + \frac{4,71}{Z^2}$
50	I-2,05	$h_1 = \frac{2,05}{Z}$	$\frac{C_{вим}}{C_{ЗВТ}} + \frac{2,05}{Z^2}$
90	I+0,6	$h_1 = \frac{0,6}{Z}$	$\frac{C_{вим}}{C_{ЗВТ}} + \frac{0,6}{Z^2}$
95	I+2	$h_1 = \frac{2}{Z}$	$\frac{C_{вим}}{C_{ЗВТ}} + \frac{2}{Z^2}$
99	I+4	$h_1 = \frac{4}{Z}$	$\frac{C_{вим}}{C_{ЗВТ}} + \frac{4}{Z^2}$
99,9	I+8	$h_1 = \frac{8}{Z}$	$\frac{C_{вим}}{C_{ЗВТ}} + \frac{8}{Z^2}$

Рисунок 6 – Блок-схема визначення оптимальної кількості вимірювань $Z_{\text{опт}}$ та класу точності засобів вимірювання

Висновки

1. Приведено модель правильності вибору та ефективного (за визначеним критерієм) використання ЗВТ.

2. Задавшись відношенням коштовності вимірювань до коштовності самих ЗВТ (Свим/СЗВТ), довірчою ймовірністю (P'), похибкою контролю дослідження Δ , визначається кількість вимірювань параметру об'єкту, який досліджується та клас точності ЗВТ, які використовуються при дослідженні.

3. Запропоновано критерій інформаційної ефективності вимірювань параметрів при дослідженні різних об'єктів ($h_1=I/Z$).

4. Запропоновано підхід переходу від традиційних метрологічних показників вимірювань і контролю параметрів об'єктів до інформаційних.

Наукова новизнаю. Запропоновано перехід в оцінці точності вимірювань від традиційних до інформаційних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Садовий М.І. Співвідношення невизначеності у наукових дослідженнях: історичний аспект/ Наукові записки. Серія : Педагогічні науки. Випуск 168. – Центральноукраїнський державний педагогічний університет імені Володимира Винниченка, м. Кропивницький. – С. 200-204.
2. International Vocabulary of Basic and General terms I Metrology (Міжнародний словник основних і загальних термінів у метрології).
3. Васілевський О.М. Основи теорії невизначеності вимірювань: підручник/ О.М. Васілевський, В.Н. Кучерук, Є.Т. Володарський. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 230 с.
4. ILAC-G17:2002. Introducing the Concept of Uncertainty of Measurement in Testing in Association with the Application of the Standard ISO/IEC 17025 (Вступ до концепції невизначеності вимірювань при випробуваннях з урахуванням застосування стандарту ISO/IEC 17025).
5. EA-04/02:1999. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration (Відображення невизначеності вимірювань при калібруванні).
6. EA-04/16:2003. EA guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing (ЄА настанови щодо відображення невизначеності при кількісних випробуваннях).
7. EURACHEM/CITAC Guide QUAM-P1:2000. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement (Розрахунок невизначеності при аналітичних вимірюваннях).
8. Настанова з оцінювання невизначеності вимірювання результатів кількісних випробувань. Технічний звіт EUROLAB №1/2006/ Переклад з англ. Та науково-технічне редагування. А.В. Абрамов, А.М.Коцюба, В.М. Новіков. – Київ, Євролаб-Україна, 2008. – 51 с.
9. Поджаренко В.О., Васілевський О.М., Кучерук В.Ю. Опрацювання результатів вимірювань на основі концепції невизначеності : навчальний посібник. – Вінниця: ПНТУ, 2008. – 128 с.
10. RACHEM/CITAC Guide, Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement, Second Edition. Laboratory of the Government Chemist, London (2000). ISBN 0-948926-15-5.

11. EURACHEM/CITAC Guide, Measurement uncertainty arising from sampling: A guide to methods and approaches. EURACHEM, (2007). Available from <http://www.eurachem.org>.
12. ISO 21748:2010. Guide to the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation. ISO, Geneva (2010).
13. Analytical Methods Committee. Measurement uncertainty evaluation for a non-negative measurand: an alternative to limit of detection. Accred. Qual. Assur. Vol 13, pp 29-32 (2008).
14. Імітаційне моделювання систем та процесів/ Електронне навчальне видання. Конспект лекцій/В.Б. Неруш, В.В. Курдеча. – К.:НТУУ «КПІ», 2012. -115 с.
- 15.Піндус Н.М. Вимірювальний експеримент та обробка результат.: конспект лекцій. -Івано-Франковськ: Факел, 2010. – 248 с.
16. Василенко О.А. Математично- статистичні методи аналізу у прикладних дослідженнях: навчальний . посібник./ О.А. Василенко, І.А. Сенча. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2011. – 166 с.
17. Chris Bissell. Vladimir Aleksandrovich Kotelnikov: Pioneer of the sampling theorem, cryptography,optimal derection, planetary mapping. IEEE Communications Magazine, 2009. – P. 24-32.
- 18.Теорема Котельникова [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://ni.biz.ua/7/7_12/7_129060_teorema-kotelnikova.html.- Заголовок з екрану.

REFERENCES

1. Sadovy M.I. Uncertainty ratio in scientific research: historical aspect/ Scientific notes. Series: Pedagogical sciences. Issue 168. - Central Ukrainian State Pedagogical University named after Volodymyr Vynnychenko, Kropyvnytskyi. - pp. 200-204.
- 2 .International Vocabulary of Basic and General terms I Metrology (International dictionary of basic and general terms in metrology).
3. Vasilevsky O.M. Fundamentals of the theory of non-significance of vimiryuvan: assistant / O.M. Vasilevsky, V.N. Kucheruk, E.T. Volodarsky. - Vinnitsa: VNTU, 2015. - 230 p.
- 4.ILAC-G17:2002. Introducing the Concept of Uncertainty of Measurement in Testing in Association with the Application of the Standard ISO/IEC 17025
5. EA-04/02:1999. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration.
6. EA-04/16:2003. EA guidelines on the expression of uncertainty in quantitative testing
7. EURACHEM/CITAC Guide QUAM-P1:2000. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement (Quantifying Uncertainty in Analytical Measurements).

8. Guidance on the assessment of uncertainty in the measurement of quantitative test results. Technical report EUROLAB No. 1/2006/ Translation from English. And scientific and technical editing. A.V. Abramov, A.M. Kotsyuba, V.M. Novikov. - Kyiv, Eurolab-Ukraine, 2008. - 51 p.
9. Podzharenko V.O., Vasilevsky O.M., Kucheruk V.Yu. Opratsyuvannya rezul'tativ vimiryuvan on the basis of the concept of non-insignificance : initial help. - Vinnitsa: PNTU, 2008. - 128 p.
10. RACHEM/CITAC Guide, Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement, Second Edition. Laboratory of the Government Chemist, London (2000). ISBN 0-948926-15-5.
11. EURACHEM/CITAC Guide, Measurement uncertainty arising from sampling: A guide to methods and approaches. EURACHEM, (2007). Available from <http://www.eurachem.org>.
12. ISO 21748:2010. Guide to the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation. ISO, Geneva (2010).
13. Analytical Methods Committee. Measurement uncertainty evaluation for a non-negative measurand: an alternative to limit of detection. Accred. Qual. Assur. Vol 13, pp 29-32 (2008).
14. Imitation modeling of systems and processes / Electronic primary knowledge. Lecture notes / V.B. Nerush, V.V. Kurdecha. - K.: NTUU "KPI", 2012. - 115 p.
15. Pindus N.M. Vimiryuvalny experiment and a summary of the result.: abstract of lectures. - Ivano-Frankivsk: Fakel, 2010. - 248 p.
16. Vasilenko O.A. Mathematical-statistical methods and analysis in applied studies: the beginning. posibnik./ O.A. Vasilenko, I.A. Sencha. - Odessa: ONAZ im. O.S. Popova, 2011. - 166 p.
17. Chris Bissell. Vladimir Aleksandrovich Kotelnikov: Pioneer of the sampling theorem, cryptography, optimal derection, planetary mapping. IEEE Communications Magazine, 2009. - P. 24-32.
18. Kotelnikov's theorem [Electronic resource]. – Access mode: http://ni.biz.ua/7/7_12/7_129060_teorema-kotelnikova.html. - Header off screen.

Received 01.03.2023.
Accepted 03.03.2023.

A model for evaluating the correctness of the choice and efficiency of use according to the specified criterion of means of observation and control of objects of various purposes

The informational approach to solving the problems of observation and control is not used until now. The theory of measurements is based on the concept of entropy of random variables as a measure of their uncertainty (a set of sets of their possible values). The greater the number of values that a discrete random variable can take, or the greater the range of a continuous random variable, the greater their entropy. The amount of information obtained during measurement, control, research corresponds to the reduction of entropy from the value that characterizes the uncertainty that remains after obtaining the result of measurement of some parameters of the objective, phenomena, etc. We are talking about the relationship between accuracy, energy consumption and speed of measuring equipment. The issue of determining the threshold of the maximum possible accuracy of measurements of actual values, as well as obtaining generalizing information-energy ratios, which allow optimizing the procedure for choosing the main quality indicators of measuring equipment (MT) are highlighted. At the same time, making an attempt to more accurately determine the value of a measurement quantity, at some stage we will inevitably encounter the fundamental impossibility of their further clarification, which is ultimately related to the physically possible degree of certainty (in contrast to entropy, which characterizes uncertainty, and which is called non-entropy) of any measurement value, which is determined either by its personal discreteness (for example, when measuring the number of atoms of any substance in a mixture, it is meaningless to talk about the accuracy of the count, which is equal to 0.1 or 0.01 atom) or by its thermal (molecular) fluctuations. This micro-scale uncertainty limit is known as Heisenberg's Uncertainty Rule. The article proposes a model of evaluation and effective use of observation and control of objects of various nature. An "informational approach" to solving the problems of choosing and using measuring equipment in the conditions of the transition from traditional metrological indicators to informational ones is proposed. Let's give an example of the choice of FTA and the number of measurements by this FTA.

Ігнаткін Валерій Устинович - доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно- інтегрованих технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Дудніков Володимир Степанович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механотроніки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Лучишин Тарас Романович - кандидат медичних наук, спеціаліст вищої категорії, заступник директора «Української готельної групи».

Алексеевко Сергій Вікторович - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри механотроніки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Юшкевич Олег Павлович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механотроніки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Карпова Тетяна Петрівна - старший викладач кафедри матеріалознавства і термічної обробки металів УДУНТ.

Хохлова Тетяна Станіславівна - кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства і термічної обробки металів УДУНТ.

Хомош Юрій Степанович - кандидат економічних наук, доцент, директор Дрогобицького фахового коледжу нафти та газу.

Тіхонов Василь Андрійович - директор Дніпровського фахового коледжу радіоелектроніки.

Valery Ustinovych Ignatkin - doctor of technical sciences, professor, professor of the department of automation and computer-integrated technologies of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Volodymyr Stepanovych Dudnikov - candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Mechatronics of Oles Honchar Dnipro National University.

Taras Romanovych Luchyshyn - candidate of medical sciences, specialist of the highest category, deputy director of the "Ukrainian Hotel Group".

Serhii Viktorovych Alekseenko - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechatronics, Dnipro National University named after Oles Honchar.

Oleh Pavlovich Yushkevich - candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Mechatronics of Dnipro National University named after Oles Honchar.

Tetyana Petrivna Karpova - senior lecturer of the Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, USUNT.

Tetyana Stanislavivna Khokhlova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals at the Ukrainian National University of Science and Technology.

Yuriy Stepanovych Khomosh - candidate of economic sciences, associate professor, director of the Drohobysk Oil and Gas Professional College.

Vasyl Andriyovych Tikhonov - director of the Dnipro Vocational College of Radio Electronics.

ЗМІСТ

CONTENTS

Токарева О.Л., Ігнат'єв О.Д., Прядко О.В. Апроксимація теплофізичних властивостей високотемпературного газу	3	Tokareva O., Ihnatiev O., Priadko O.V. Approximation of the thermo- physical properties of high-temperature gas	3
Василів С.С., Тернова К.В. Моделювання вдуву продуктів детонації в надзвукову частину сопла	11	Vasiliv S.S., Ternova K.V. Study of the flow structure during the injection of detonation prod- ucts into the supersonic nozzle	11
Гречаний О.М., Васильченко Т.О., Бадло В.В., Чувальський М. В., Падалка О.О., Пархоменко В.В. Аналіз конструктивних факторів, що впливають на втомну міцність деталей металургійного обладнання	19	Hrechanyi O.M., Vasilchenko T.O., Badlo V.V., Chuvalskyi M.V., Padalka O.O., Parkhomenko V.V. Analysis of constructive factors affecting the fatigue strength of metallurgical equipment parts	19
Поляков М.О., Андрієнко П.Д., Вітцківський І.Ю., Поляков О.М. Принципи побудування інформаційно-керуючої системи кафедри університету	30	Polyakov M.A., Andrienko P.D., Vittsivskyi I.Yu., Polyakov A.M. Principles of construction of the information and control system of the department of the university	30
Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В. Обґрунтування технологічних режимів для формування стабільного одиничного треку при товщині шару 30 мкм зі сплаву INCONEL 718	43	Adjamskiy S., Kononenko A., Podolskyi R. Justification of technological modes for the formation of a stable single track at a thickness of a 30-µm layer of INCONEL 718 alloy	43

Жуков О.О., Горбенко В.І. Використання архітектур глибоких згорткових нейронних мереж та tensorflow у задачі визначення бджіл на зображенні	53	Zhukov O.O., Horbenko V.I. Using deep cnn architectures and tensorflow for bee identification on images	53
Калініна І.О., Гожий О.П., Нечахін В.В., Шиян С.І. Синтез параметрів нелінійної прогнознаї моделі за допомогою генетичного алгоритму	66	Kalinina I.O., Gozhiy O.P., Nechakhin V.V., Shiyan S.I. Synthesis of the parameters of a nonlinear predictive model using a genetic algorithm	66
Твердоступ М.І. Особливість рішення задач мінімізації булевих функцій	76	Tverdostup N.I. A peculiarity of solving problems of minimization of Boolean func- tions	76
Білозьоров В.Є., Зайцев В.Г., Погорєлов О.В., Хижа О.Л. Використання методу нелінійного рекурентного аналізу до типізації даних часових рядів електроенцефалографії	82	Belozyorov V.Ye., Zaytsev V.G., Pohorielov O.V., Khizha A.L. Using the method of nonlinear recursive analysis for typifying electroencealography time series data	82
Сулема Е.С., Дичка А.И. Повышение помехоустойчивости многоцветных штрихкодовых изображений	105	Sulema Ye.S., Dychka A.I. Improving the interference resistance of multi-color barcode images	105
Ігнаткін В.У., Дудніков В.С., Лучишин Т.Р., Алексєєнко С.В., Юшкевич О.П., Карпова Т.П., Хохлова Т.С., Хомош Ю.С., Тіхонов В.А. Модель оцінювання правильності вибору та ефективності використання за визначеним критерієм засобів спостереження та контролю об'єктів різного призначення	125	Ignatkin V.U., Dudnikov V.S., Luchyshyn T.R., Alekseenko S.V., Yushkevich O.P., Karpova T.P., Khokhlova T.S., Khomosh Yu.S., Tikhonov V.A. Model for evaluating the correctness of the choice and efficiency of use according to the specified criterion of means of observation and control of objects of various purposes	125

РЕФЕРАТИ

УДК 533.6.013.14 : 629.1.025.3

Токарева О.Л., Ігнат'єв О.Д., Прядко О.В. **Апроксимація теплофізичних властивостей високотемпературного газу** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(145). – Дніпро, 2023. –С.3 – 10.

Для чисельного дослідження високотемпературних газодинамічних процесів запропоновано апроксимуючі залежності теплофізичних властивостей повітря від температури. Середня по температурному ряду похибка апроксимації не перевищує 0,87%. Перевагою даного підходу є їх використання у багатофункціональних програмних пакетах чисельного моделювання та інженерного аналізу. Апроксимуючі залежності теплофізичних властивостей використовувалися для дослідження засобами програмного пакету ANSYS процесів, що протікають у сопла ракетних двигунів. Запропоновано підхід для апроксимації багатопараметричних залежностей.

Бібл. 11.

УДК 629.76/.78; 629.78; 629.76

Василів С.С., Тернова К.В. **Моделювання вдуву продуктів детонації в надзвукову частину сопла** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(145). – Дніпро, 2023. –С.11 – 18.

Актуальність тематики даної роботи визначається необхідністю розробки системи уникнення зіткнення ракети з елементами космічного сміття. Мета роботи - моделювання процесу вдуву продуктів детонації в сопло ракетного двигуна для створення альтернативних способів керування вектором тяги ракетного двигуна верхнього ступеня. Розроблено схему системи керування вектором тяги ракетного двигуна впливом детонаційної хвилі на потік газу в його соплі. Проведено чисельне моделювання процесу вдуву продуктів детонації в сопло при різних кутах нахилу детонаційного газогенератору до осі камери згорання.

Бібл. 9., іл. 4.

УДК 620.169.1

Гречаний О.М., Васильченко Т.О., Бадло В.В., Чувальський М. В., Падалка О.О., Пархоменко В.В. **Аналіз конструктивних факторів, що впливають на втомну міцність деталей металургійного обладнання** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(145). – Дніпро, 2023. –С.19 – 29.

Проаналізовані причини втомного руйнування деталей металургійного обладнання. Встановлено взаємозв'язок впливу якості обробки поверхні деталі на втомну міцність. Наведено визначення впливу концентраторів місцевих напружень на втомну міцність. Дані рекомендації щодо підвищення втомної міцності готової деталі.

Бібл. 15, іл. 4, табл. 0

УДК 004.9: 005.4

Поляков М.О., Андрієнко П.Д., Вітцківський І.Ю., Поляков О.М. **Принципи побудовання інформаційно-керуючої системи кафедри університету** // Системні технології.

Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(145). - Дніпро, 2023. - С.30 – 42.

Систематизовано поняття інформаційно-керуючої системи кафедри університету, яка веде підготовку спеціалістів електротехнічного профілю. Запропоновано принципи побудови та структурну схему такої системи. Описано варіанти застосування у навчальному процесі. Особливістю запропонованої системи є інтеграція комп'ютерної та мікроконтролерної навчальної інфраструктури кафедри із системою «розумного дому» приміщень корпусу університету.

Бібл. 16, табл. 1, іл. 6.

УДК 621.762. 621.76.621.79

Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В. **Обґрунтування технологічних режимів для формування стабільного одиничного треку при товщині шару 30 мкм зі сплаву INCONEL 718** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(145). - Дніпро, 2023. -С.43 – 52.

При селективному лазерному плавленні (далі -СЛП) виріб складається з множини одиничних шарів, які в свою чергу створюються з множини одиничних треків. У даній роботі одиничні треки створювалися на базовому майданчику, виготовленому з того ж матеріалу. З аналізу зовнішнього вигляду дослідних зразків встановлено, що при потужностях 100..150 Вт та швидкостях сканування 1800...3400 мм/с формується стабільний трек, а при зменшенні швидкості відбувається розбризкування та переплавлення основного металу. Встановлено область раціональної щільності енергії 37...41 Дж/мм³ для побудови деталей зі сплаву Inconel 718 при товщині шару 30 мкм.

Бібл. 12, іл. 4.

УДК 004.8

Жуков О.О., Горбенко В.І. **Використання архітектур глибоких згорткових нейронних мереж та tensorflow у задачі визначення бджіл на зображенні** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(145). - Дніпро, 2023. - С.53 –65.

Розглядається ефективність використання архітектур глибоких згорткових нейронних мереж для ідентифікації та підрахунку бджіл. В якості джерела даних для моделей нейронних мереж було використано анотовані вручну фотографії бджіл. Розглянуто та проаналізовано ефективність роботи навчених моделей на тестових зображеннях.

Бібл. 17.

Калініна І.О., Гожий О.П., Нечахін В.В., Шиян С.І. **Синтез параметрів нелінійної прогнозної моделі за допомогою генетичного алгоритму** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(145). - Дніпро, 2023. - С.66 –75.

В статті розглядається визначення та оцінка параметрів нелінійної регресійної моделі за допомогою генетичного алгоритму. Оцінка параметрів, є різновидом задачі оптимізації, що дає змогу її розв'язувати за допомогою стохастичних алгоритмів, це представляє можливість

використання таких алгоритмів, щоб відповідати моделям нелінійної регресії. Було досліджено набір даних trees, який відображає нелінійну залежність між ознаками. В наборі міститься 1200 спостережень і три змінних: ID дерева; вік дерева; об'єм деревини. Була проаналізована залежність об'єму деревини (Vol) від віку дерева (Age). Увага на локації дерев дозволило підібрати логістичну функцію Річардса в якості функціональної залежності, нелінійною як за параметрами, так і за змінною. Для оцінки параметрів функції Річардса було використано генетичний алгоритм. Були обчислені коефіцієнти нелінійних моделей для випадково обраних локацій дерев. Для оцінки якості моделей використано коефіцієнт детермінації R².

Бібл. 15.

УДК 681.32(075.8)

Твердоступ М.І. **Особливість рішення задач мінімізації булевих функцій** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(145). – Дніпро, 2023. – С.76 –81.

Використанням методів мінімізації за алгоритмами Квайна та діаграм Вейча підтверджена обов'язкова необхідність знаходження множини зображень мінімальної форми булевої функції для забезпечення можливості вибору оптимальної логічної схеми проектного цифрового автомату.

Бібл. 3, іл. 1, табл. 1

УДК 519.2:004.9

Білозьоров В.Є., Зайцев В.Г., Погорєлов О.В., Хижа О.Л. **Використання методу нелінійного рекурентного аналізу до типізації даних часових рядів електроенцефалографії** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(145). – Дніпро, 2023. – С.82 –104.

У даної роботи розглядається питання використання методу нелінійного рекурентного аналізу до проблеми типізації інформації, що надана у вигляді даних часових рядів електроенцефалограм (ЕЕГ) знятих з пацієнту. Описано методика визначення схованої інформації для цього ряду та її використання для побудови відповідної рекурентної діаграми (recurrence plots, RP) у точки зьому інформації. Показано, що використання RP має суттєві недоліки, які пов'язані з візуалізацією інформації на екрані монітору комп'ютера, тому запропоновано інший шлях дослідження - обрахування чисельних показників RP. Їх обрахування потрібно здійснити для кожної точки зьому інформації, в якості яких було запропоновано узяти точки (O1, O2, Pz) - це праве та ліве потиличне та тім'яне відведення. Наведені обраховані показники RP дозволили здійснити типізацію отриманих даних та визначити тип якій отримав назву «HEALTHY-RP», що відрізняє епілептичні та неепілептичні типи ЕЕГ.

Бібл. 12, іл.15, табл. 2.

УДК 004.627

Сулєма Е.С., Дичка А.И. **Повышение помехоустойчивости многоцветных штрихкодových изображений** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(145). – Дніпро, 2023. – С.105 –124.

Предложен метод повышения помехоустойчивости многоцветных штриховых кодов, основанный на применении двухуровневого контроля ошибок, возникающих при сканировании многоцветного штрихкодowego изображения, с использованием двух многозначных корректирующих кодов: кода БЧХ – на уровне штрихкодowych знаков (нижний уровень), и кода Рида-Соломона – на уровне штрихкодowego символа (верхний уровень). Предлагаемый метод повышения помехоустойчивости штрихкодowych изображений дает возможность создавать многоцветные штриховые коды с улучшенными характеристиками помехоустойчивости, которые обеспечивают надежное воспроизведение данных при сканировании многоцветных штрихкодowych изображений большой емкости в системах автоматической идентификации.

Библ. 16, ил. 4, таб. 3.

УДК 519.281: 621.317.088

Ігнаткін В.У., Дудніков В.С., Лучишин Т.Р., Алексєєнко С.В., Юшкевич О.П., Карпова Т.П., Хохлова Т.С., Хомош Ю.С., Тіхонов В.А. **Модель оцінювання правильності вибору та ефективності використання за визначенням критерієм засобів спостереження та контролю об'єктів різного призначення** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 2(145). – Дніпро, 2023. – С.125 –142.

У статті приведено модель вибору ефективного, за визначенням критерієм, використання засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). Задавшись відношенням коштовності вимірювань (контролю) до коштовності самих ЗВТ, а також довірчою ймовірністю і похибкою вимірювань (контролю), визначається кількість вимірювань (контролю) параметру об'єкту дослідження та клас точності ЗВТ, який використовується при дослідженні. Запропоновано критерій інформаційної ефективності вимірювань (контролю) параметрів при дослідженні різних об'єктів, тобто запропоновано перехід від традиційних метрологічних показників вимірювань і контролю до інформаційних. При цьому, роблячи спробу все точніше визначити значення вимірювальної величини чи якогось параметру об'єкту, ми на деякому етапі неминуче зіткнемося з принциповою неможливістю подальшого їх уточнення на підставі «Правило невизначеності Гейзенберга».

Бібл.18, іл.6, табл. 2.

UDC 533.6.013.14 : 629.1.025.3

Tokareva O., Ihnatiev O., Priadko O.V. **Approximation of the thermophysical properties of high-temperature gas** // System technologies. N 2(145) - Dnipro, 2023.- P.3 – 10.

For the numerical study of high-temperature gas-dynamic processes, approximating dependences of the thermophysical properties of air on temperature are proposed. The approximation error averaged over the temperature series does not exceed 0.87%. The advantage of this approach is the possibility of their use in multifunctional software packages for numerical simulation and engineering analysis. The approximating dependences of thermo physical properties were used to study by means of the ANSYS software package the processes occurring in the nozzles of rocket engines. An approach is proposed for approximating multiparameter dependencies

Bibl. 11.

UDK 629.76/.78; 629.78; 629.76

Vasiliv S.S., Ternova K.V. **Study of the flow structure during the injection of detonation products into the supersonic nozzle** // System technologies. N 2(145) - Dnipro, 2023.- P.11 – 18.

The relevance of the topic of this work is determined by the need to develop a system to avoid the collision of a rocket with elements of space debris. The purpose of the work is simulating injection process in rocket nozzle to develop alternative methods of controlling the thrust vector of the upper stage rocket engine. The scheme of the control system of the thrust vector of a rocket engine by the effect of a detonation wave on the gas flow in its nozzle has been developed. Numerical modeling of the process of blowing detonation products into the nozzle at different angles of inclination of the detonation gas generator to the axis of the combustion chamber was carried out.

Bibl. 9., ill. 4.

UDC 620.169.1

Hrechanyi O.M., Vasilchenko T.O., Badlo V.V., Chuvalskyi M.V., Padalka O.O., Parkhomenko V.V. **Analysis of constructive factors affecting the fatigue strength of metallurgical equipment parts** // System technologies. N 2(145) - Dnipro, 2023.- P.19 – 29.

The causes of fatigue failure of metallurgical equipment parts were analyzed. The correlation between the effect of the quality of surface treatment of the part on the fatigue strength has been established. The influence of local stress concentrators on fatigue strength has been determined. Recommendations for increasing the fatigue strength of the finished part were given.

Ref.15, fig. 4, tabl. 0.

UDC 004.9: 005.4

Polyakov M.A., Andrienko P.D., Vittsivskyi I.Yu., Polyakov A.M. **Principles of construction of the information and control system of the department of the university** // System technologies. N 2(145) - Dnipro, 2023.- P.30 – 42.

The concept of the information control system of the university department, which trains specialists in the electrotechnical profile, was systematized. The construction principles and structural diagram of such a system are proposed. Variants of application in the educational process are described. A feature of the proposed system is the integration of the computer-microcontroller educational infrastructure of the department with the "smart home" system of the premises of the university building.

Bibl. 16, tab. 1, ill. 6.

UDC 621.762. 621.76.621.79

Adjamskiy S., Kononenko A., Podolskiy R. **Justification of technological modes for the formation of a stable single track at a thickness of a 30- μ m layer of INCONEL 718 alloy** // System technologies. N 2(145) - Dnipro, 2023.- P.43 – 52.

With selective laser melting (hereinafter - SLP), the product consists of a set of single layers, which in turn are created from a set of single tracks. In this work, single tracks were created on a base platform made of the same material. From the analysis of the appearance of the test samples, it was established that at powers of 100...150 W and scanning speeds of 1800...3400 mm/s, a stable track is formed, and when the speed decreases, sputtering and remelting of the base metal occurs. The range of rational energy density of 37...41 J/mm³ for construction of parts from the Inconel 718 alloy with a layer thickness of 30 microns.

Bibl. 12, ill. 4.

UDK 004.8

Zhukov O.O., Horbenko V.I. **Using deep cnn architectures and tensorflow for bee identification on images** // System technologies. N 2(145) - Dnipro, 2023.- P.53 – 65.

Individual bee identification is an important task that, if performed well, will help to track the bee hive population and its health state in general. Photographs of bee hive frames with bees on them are being used as a data source for model training. These photographs were manually annotated using Remo annotation software. The study uses five widely used deep learning architectures for the purpose of bee detection on test images. These models were trained on the same dataset and evaluated on the same bee image set.

Bibl. 17.

Kalinina I.O., Gozhiy O.P., Nechakhin V.V., Shiyan S.I. **Synthesis of the parameters of a nonlinear predictive model using a genetic algorithm** // System technologies. N 2(145) - Dnipro, 2023.- P.66 – 75.

The article deals with the definition and estimation of the parameters of a nonlinear regression model using a genetic algorithm. Parameter estimation is a type of optimization problem that can be solved using stochastic algorithms, which presents the possibility of using such algorithms to fit nonlinear regression models. The trees data set, which displays the nonlinear relationship between traits, was investigated. The nonlinear method of least squares (NLS) was used to find the coefficients of the regression equation using a genetic algorithm on the trees data set belonging to the spuRs library. The set contains 1200 observations and three variables: tree ID; age of the tree; volume of wood. Visual analysis revealed the presence of

additional signs that affect the volume of wood. Only data for trees with a certain location are selected for further work. As a result, the sample has 12 observations and two variables. The dependence of the volume of wood (Vol) on the age of the tree (Age) was analyzed. Attention to tree locations made it possible to choose the Richards logistic function as a functional dependence, nonlinear both in terms of parameters and variables. A genetic algorithm was used to estimate the parameters of the Richards function. The result of the work of the genetic algorithm depends on how its parameters are configured. When implementing the genetic algorithm, the following parameters were set: population size; the maximum number of iterations after which the work of the genetic algorithm stops; the number of consecutive generations without any improvement in the value of the fitness function before stopping the algorithm. A random scheme was used for the selection operation. A mutation operation involves changing a randomly selected bit. The type of crossover operation is one-point. Coefficients of nonlinear models were calculated for randomly selected tree locations. The coefficient of determination R^2 was used to assess the quality of the models.

Bibl. 15.

UDK 681.32(075.8)

Tverdostup N.I. **A peculiarity of solving problems of minimization of Boolean functions** // System technologies. N 2(145) - Dnipro, 2023.- P.76 – 81.

Using methods of minimization according to the algorithms of Quine et Veitch diagrams confirmed the mandatory necessity of finding a set of images of the minimal form of the Boolean function to ensure the possibility of choosing the optimal logic circuit of the designed digital automaton.

Bibl. 3, ill. 1, tabl. 1

UDC 519.2:004.9

Belozyorov V.Ye., Zaytsev V.G., Pohorielov O.V., Khizha A.L. **Using the method of nonlinear recursive analysis for typifying electroenceelography time series data** // System technologies. N 2(145) - Dnipro, 2023.- P.82 – 104.

This paper considers the issue of using the method of nonlinear recurrent analysis to the problem of typing information provided in the form of time series data of electroencephalograms (EEG) taken from a patient. A technique for determining hidden information for this series and its use for constructing the corresponding recurrence diagram (RP) at the points of information retrieval are described. It is shown that the use of RP has significant drawbacks associated with the visualization of information on a computer monitor screen, so another way of research is proposed - the calculation of numerical indicators of RP. Their calculation must be carried out for each point of the seventh information, for which it was proposed to take the points (O1, O2, Pz) - these are the right and left occipital and parietal taps. The given RP indicators made it possible to typify the obtained data and determine the type of which was called "HEALTHY-RP", which distinguishes epileptic and non-epileptic EEG types.

Bible 12, ill.15, tab. 2.

Sulema Ye.S., Dychka A.I. **Improving the interference resistance of multi-color barcode images** // System technologies. N 2(145) - Dnipro, 2023.- P.105 – 124.

A method of improving the interference resistance of multi-color barcodes is proposed, which is based on the application of two-level control of errors that occur when scanning a multi-color barcode image, using two multi-valued correcting codes: the BCH code - at the level of barcode patterns (lower level), and the Reed-Solomon code - at barcode symbol level (top level).

The proposed method makes it possible to create multi-color barcodes with improved immunity characteristics, which ensure reliable reproduction of data during scanning of large-capacity multi-color barcode images in automatic identification systems.

Ref. 16, il. 4, tab. 3.

Ignatkin V.U., Dudnikov V.S., Luchyshyn T.R., Alekseenko S.V., Yushkevich O.P., Karpova T.P., Khokhlova T.S., Khomosh Yu.S., Tikhonov V.A. **Model for evaluating the correctness of the choice and efficiency of use according to the specified criterion of means of observation and control of objects of various purposes** // System technologies. N 2(145) - Dnipro, 2023.- P.125 – 142.

The article presents a model for choosing an effective, according to a defined criterion, use of measuring equipment (ME). Given the ratio of the value of measurements (control) to the value of the FTAs themselves, as well as the confidence probability and error of the measurements (control), the number of measurements (control) of the parameter of the research object and the accuracy class of the FTA used in the study are determined. A criterion for the information efficiency of measurement (control) parameters during the study of various objects is proposed, i.e. a transition from traditional metrological indicators of measurement and control to information ones is proposed. At the same time, making an attempt to more accurately determine the value of a measurement quantity or some parameter of an object, at some stage we will inevitably face the fundamental impossibility of their further clarification on the basis of the "Heisenberg Uncertainty Rule".

Bibl. 18, ill. 6, table. 2.

Системні технології

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Випуск 2 (145)

Головний редактор: к.т.н., доц. Т.В. Селівьорстова

Технічний редактор та секретар збірки: к.т.н., доц. К.Ю. Островська

Здано до набору 01.03.2023. Підписано до друку 31.03.2023.

Формат 60x84 1/16. Друк - різнограф. Папір типограф.

Умов. друк арк. – 10,857. Обл.–видавн. арк. – 9,5.

Тираж 300 прим. Замовл. – 02/23

Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»,
кафедра Інформаційних технологій та систем: ІВК «Системні технології»
49600, Дніпро, а/с 493

<http://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:

Серія КВ № 8684 від 23 квітня 2004 рік

Редакційна колегія

Селівьорстова Тетяна Віталіївна
(головний редактор)

доцент, кандидат технічних наук

Алпатов Анатолій Петрович

Член-кореспондент НАН України,
професор, доктор технічних наук

Архипов Олександр Євгенійович

професор, доктор технічних наук

Бабічев Сергій Анатолійович

доцент, доктор технічних наук

Білозьоров Василь Євгенович

професор,

доктор фізико-математичних наук

Гече Федір Елемирович

професор, доктор технічних наук

Гуда Антон Ігорович

(заст. головного редактора)

професор, доктор технічних наук

Гнатушенко Вікторія Володимирівна

(вчений секретар)

професор, доктор технічних наук

Гнатушенко Володимир Володимирович

професор, доктор технічних наук

Гожий Олександр Петрович

професор, доктор технічних наук

Єрьомін Олександр Олегович

професор, доктор технічних наук

Кіріченко Людмила Олегівна

професор, доктор технічних наук

Світличний Дмитро Святозарович

професор, доктор технічних наук

Скалозуб Владислав Васильович

професор, доктор технічних наук

Хандецький Володимир Сергійович

професор, доктор технічних наук

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Інститут технічної механіки

НАНУ і ДКАУ, Україна

Національний технічний університет

України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського», Україна

Jan Evangelista Purkyně University
in Ústí nad Labem

Університет імені Яна Євангеліста Пуркіне,
Усті над Лабем, Чеська Республіка

Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара, Україна

Ужгородський національний університет,
Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка», Україна

Чорноморський національний університет
імені П.Могили, Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Харківський національний університет
радіоелектроніки, Україна

Akademia Górniczo-Hutnicza

Краківська гірничо-металургійна академія
ім. С. Сташіца, Польща

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту» Україна

Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара, Україна