

Міністерство освіти і науки України

Системні технології

System technologies

3 (146) 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 3 (146). - Дніпро, 2023. – 163 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»,
ІВК «Системні технології», 2023

РЕГРЕСІЙНИЙ АНАЛІЗ ІМПУЛЬСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УКОРОЧЕНОГО НАДЗВУКОГО СОПЛА

Анотація. Актуальність роботи визначається необхідністю вибору оптимального контуру надзвукової частини сопла для підвищення імпульсних характеристик потоку в укороченому соплі. Розглянута в роботі регресійна модель надзвукового потоку в укороченому соплі з насадком, створена на основі отриманих раніше результатів моделювання в пакеті ANSYS. Ціль роботи – вибір оптимального контуру укороченого сопла з дзвоноподібним насадком з урахуванням геометричних та технологічних параметрів. Аналіз даних проводився на основі програми STATGRAPHICS Plus. Отримані величини впливу кожного прийнятого фактора і їх взаємний вплив на підвищення тягових характеристик потоку в укороченому соплі. Побудована регресійна модель дозволяє вибрати оптимальний контур укороченого сопла з насадком.

Ключові слова: укорочене надзвукове сопло, дзвоноподібний насадок, тиск, імпульсна характеристика.

Постановка проблеми. При проектуванні та відпрацюванні ракетних двигунів важливою проблемою є вибір оптимального контуру надзвукової частини сопла. Раніше використовувалися переважно традиційні сопла Лавалю. Однак з розвитком ракетно-космічної техніки почали з'являтися різні контури сопел, що відповідають новим завданням, вимогам до щільності компонування, необхідності підвищення коефіцієнта імпульсу, обліку різних умов роботи тощо. Перспективним типом сопел для ракетних двигунів вважаються дзвоноподібні сопла, які мають, на відміну від класичного сопла Лавалю, більший кут входу в надзвукову частину сопла. В роботах [1-2] досліджуються сопла з двійним раструбом (Duel-bell nozzle), які мають два різних режими роботи та забезпечують підвищення продуктивності. Течії в укорочених соплах з різними насадками мають свої особливості і переваги. В роботах [3-4] досліджуються характеристики укорочених сопел Лавалю з дзвоноподібним насадком. З використанням обчислювального пакету ANSYS Fluent показано, що на картини течії в соплі впливає довжина вхідної конічної частини, загальна довжина сопла та

умови роботи сопла, тобто вхідний тиск та тиск навколишнього середовища. Було встановлено, що характер відривної течії в насадку, а значить і коефіцієнт імпульсу, залежить від ступеня розширення потоку з укороченого сопла. Необхідно виявити основні геометричні і технологічні параметри течій в укороченому соплі з дзвоноподібним насадком та визначити залежність коефіцієнту імпульсу від них.

Мета роботи – вибір оптимального контуру укороченого сопла з дзвоноподібним насадком з урахуванням геометричних та технологічних параметрів.

Аналіз одержаних даних проводився на основі програми STATGRAPHICS Plus [5], яка дозволяє проводити повне факторне планування технологічних процесів на основі центрально-композиційних ротатабельних планів другого порядку.

Якщо ми маємо справу з k факторами, кожен з яких може встановлюватися на q рівнях, то для того, щоб здійснити повний факторний експеримент необхідно поставити $n = q_k$ дослідів. Найбільшого поширення набули експерименти, в яких фактори варіюються на двох рівнях, тобто експерименти типу 2^k . В нашому випадку незалежними факторами є два геометричних і два технологічних параметра: довжина конічної частини (l) та загальна довжина сопла (L), вхідний тиск (P_0) та тиск зовнішнього середовища за соплом (P_n). Функція відгуку – коефіцієнт імпульсу (K_T). Вибрані фактори задовольняють вимогам керуваності, взаємнезалежності, однозначності, яким повинні задовольняти варіативні фактори при плануванні експерименту.

Необхідно провести кодування факторів для переведення натуральних значень факторів в безрозмірні величини. Це забезпечує можливість порівняльної оцінки впливу на процес різних параметрів незалежно від їх розмірності, а також дозволяє побудувати стандартну ортогональну план-матрицю експерименту. Зв'язок між кодованим і натуральним виразом фактора задається фо-

рмулою:
$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i},$$
 де x_i – кодований вираз i -го фактора; X_i – натуральне значення фактора; X_{i0} – значення i -го фактора на нульовому рівні; ΔX_i – інтервал варіювання i -го фактора.

В таблиці 1 наведено інтервали варіювання факторів, що розглядаються.

Область зміни факторів

Фактор	Код фактору	Одиниця виміру	Рівні факторів		
			-1	0	1
Довжина конічної частини сопла l	X1	мм	5	10	20
Загальна довжина сопла L	X2	мм	30	35	45
Тиск на вході P ₀	X3	бар	100	200	300
Тиск зовнішній P _н	X4	бар	0,1	0,55	1,0

Використовуються поліноміальні плани другого порядку виду:

$$Y = a_0 + \sum_i^n a_i \cdot x_i + \sum_i^n a_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i < j}^n a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$$

де Y – функція відклику (K_T); a₀ – вільний член рівняння; a_i · x_i, a_{ii} · x_i² – лінійні і квадратичні доданки; ± a_{ij} · x_i · x_j – доданки парних добутоків факторів; n = 4 – число перемінних факторів.

За вихідний матеріал було прийнято параметри потоку і геометричні параметри укороченого сопла з насадком [3 - 4]. За результатами розрахунків параметрів визначався коефіцієнт імпульсу K_T.

Проведемо аналіз отриманої регресійної моделі на основі оцінки статистичної значущості коефіцієнтів отриманої регресійної моделі. Коефіцієнти моделі, для яких p-рівень (p-value) менше 0,05, вважаються статистично значущими при довірчій ймовірності 95%. Найбільш зручно і наочно значимість коефіцієнтів моделі можна перевірити за допомогою Pareto Chart (Парето-карта).

Standardized Pareto Chart for K_T

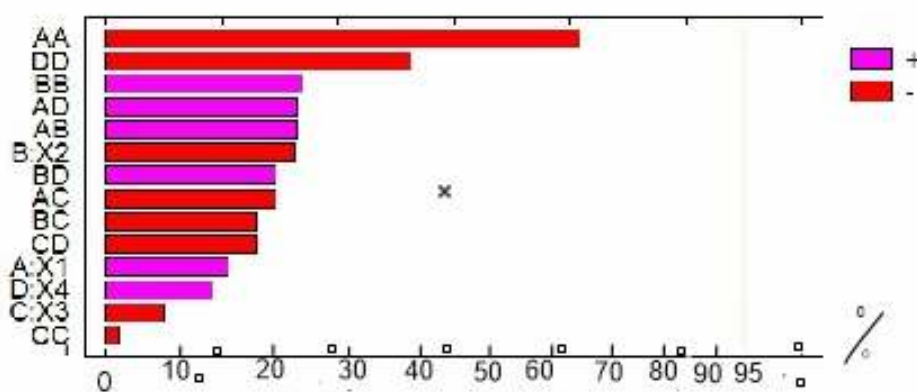


Рисунок 1 – Парето-карта коефіцієнтів моделі

Горизонтальні стовпці свідчать про статистичну значущість відповідних коефіцієнтів моделі. Парето-карта наочно підтверджує статистичну незначущість коефіцієнтів, встановлену за допомогою таблиці дисперсійного аналізу, а саме: коефіцієнтів при першому ступені всіх факторів, за винятком X2, при квадраті X3 та X4. Тому при розрахунках члени з зазначеними коефіцієнтами можуть не враховуватися. Як видно з наведених на рис. 1 даних, статистично значущими є коефіцієнти при $X1^2$, $X2^2$ та $X3^2$.

Парето-карта також дає уявлення про порівняльну значущість вхідних факторів для досліджуваного процесу. Збільшення довжини горизонтальних стовпців свідчить про збільшення впливу на процес відповідного фактора. Колонки, колір яких відзначений знаком плюс, відповідають факторам і їх парним взаємодіям, які сприяють зростанню цільової функції. І, навпаки, колонки, колір яких відзначений знаком мінус, відповідають факторам і їх парним взаємодіям, які сприяють зменшенню значень цільової функції.

З урахуванням значущості коефіцієнтів рівняння регресії має вигляд:

$$K_T = 1,64 - 0,01L - 0,033l^2 + 0,01L^2 - 0,23P_n^2 + 0,012l \cdot L - 0,01l \cdot P_0 + 0,012l \cdot P_n + 0,1L \cdot P_n$$

Адекватність отриманої моделі підтверджується високим значенням коефіцієнта детермінації $R^2 = 86,4 \%$.

На рис. 2 а) представлений тривимірний графік залежності цільової функції K_T від факторів l і L (коефіцієнту імпульсу від геометричних параметрів). При цьому фактори P_0 і P_n зафіксовані на середньому рівні (тобто X3, X4 на нульовому рівні). Переріз графіка має сідловидну форму (рис. 2 б), Найбільше значення K_T при фіксованих при $P_0 = 0,5$ бар і $P_n = 100$ бар відзначено при середньому значенні довжини конічної частини сопла ($l = 10$ мм).

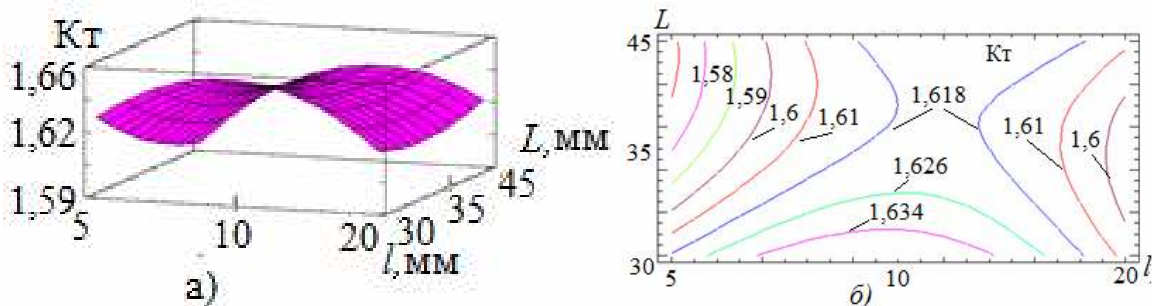


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнту імпульсу від геометричних параметрів сопла (а) та переріз зазначеної залежності (б)

На рис. 3 представлений тривимірний графік залежності цільової функції K_T від факторів X3 і X4 (коефіцієнту імпульсу від тиску на вході в сопло P_0 та зо-

внішнього середовища P_n) при фіксованих факторах X_1 і X_2 (l і L) на нульовому рівні (див. табл. 1).

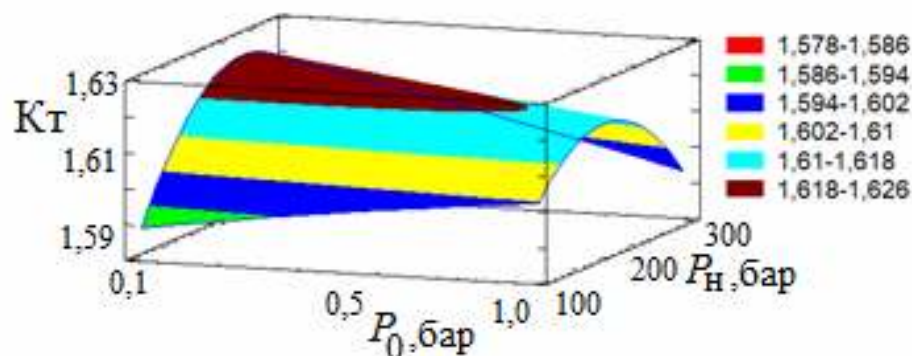


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнту імпульсу від тиску на вході P_0 в сопло та тиску зовнішнього середовища P_n

Переріз графіка має еліпсоподібні лінії на відміну від залежностей K_T від геометричних параметрів. Найбільше значення K_T для $l = 10$ мм і $L = 35$ мм досягається при збільшенні тиску зовнішнього середовища до 1,0 бар. Вхідний тиск має перемінний вплив: при збільшенні тиску до 200 бар K_T збільшується до максимального значення, а потім зменшується до мінімального значення при $P_n=300$ бар.

Висновки

Проведений регресійний аналіз даних дозволив визначити формулу залежності коефіцієнту імпульсу від довжини конічної частини, загальної довжини сопла, тиску на вході в сопло та тиску зовнішнього середовища. Ця функція являє собою функцію другого порядку. Побудовані тривимірні графіки залежності цільової функції показали, що збільшення тиску зовнішнього середовища веде до збільшення імпульсної характеристики при середньому значенні тиску на вході в сопло. Залежності коефіцієнту імпульсу від довжини конічної частини, загальної довжини сопла та від вхідного тиску носить перемінний характер – K_T збільшується при збільшенні цих параметрів до значення їх середньої величини, а потім зменшується при подальшому рості параметрів. Така поведінка коефіцієнту імпульсу обумовлена хвилевою природою потоку у надзвуковому соплі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Emelyanov V. N., Volkov K. N., Yakovchuk M. S. Unsteady Flow in a Dual-Bell Nozzle with Displacement of an Extendible Section from the Initial to Working Position // Fluid Dynamics. – 2022. – Vol. 57, Suppl. 1. – P. 35 – 45.

2. Chloé Nürnberger-Génin, R. Stark Experimental Study on Flow Transition in Dual Bell Nozzles // Journal of Propulsion and Power. – 2009. – №2. – P. 1 – 8.
3. Ternova K., Strelnikov G., Pryadko N., Ihnatiev O. Characteristics of a Shortened Laval Nozzle with a Bell-shaped Nozzle // Технічна механіка. – 2022. – № 3. – С.35 – 46.
4. Ternova K., Strelnikov G., Pryadko N., Katrenko M.O. Influence of the bell-shaped tip shape on the thrust characteristic of a truncated nozzle // Технічна механіка. – 2022. – № 4. – С. 26 – 34.
5. Сергеев П. В., Білецький В. С. Комп'ютерне моделювання технологічних процесів переробки корисних копалин (практикум). – Маріуполь: Східний видавничий дім, 2016. – 119 с.

REFERENCES

1. Emelyanov V. N., Volkov K. N., Yakovchuk M. S. Unsteady Flow in a Dual-Bell Nozzle with Displacement of an Extendible Section from the Initial to Working Position // Fluid Dynamics. – 2022. – Vol. 57, Suppl. 1. – P. 35 – 45.
2. Chloé Nürnberger-Génin, R. Stark Experimental Study on Flow Transition in Dual Bell Nozzles // Journal of Propulsion and Power. – 2009. – №2. – P. 1 – 8.
3. Ternova K., Strelnikov G., Pryadko N., Ihnatiev O. Characteristics of a Shortened Laval Nozzle with a Bell-shaped Nozzle // Technical mechanics. – 2022. – № 3. – С.35 – 46.
4. Ternova K., Strelnikov G., Pryadko N., Katrenko M.O. Influence of the bell-shaped tip shape on the thrust characteristic of a truncated nozzle // Technical mechanics. – 2022. – № 4. – С. 26 – 34.
5. Sergeev P. V., Biletsky V. S. Computer modeling of technological processes for the processing of brown copalins (workshop). – Mariupol: Skhidny vydavnichiy dim, 2016. – 119 p.

Received 31.03.2023.

Accepted 03.04.2023.

Regression analysis of impulse characteristics shorted supersonic nozzle

When designing and testing rocket engines, an important problem is the choice of the contour of the supersonic part of the nozzle. Recently, with the development of rocket and space technology, different contours of nozzles have appeared that meet new tasks, requirements for the density of the layout, the need to increase the momentum coefficient, accounting for various operating conditions, etc. Therefore, the relevance of the work is determined by the need to choose the contour of the supersonic part of the nozzle to increase the impulse characteristics of the flow in the shortened nozzle. The goal of the

work is to choose the optimal contour of a shortened nozzle with a bell-shaped nozzle, taking into account geometric and technological parameters. The regression model of the supersonic flow in a shortened nozzle with a nozzle considered in the work was created on the basis of previously obtained simulation results in the ANSYS package. It has been found that the flow patterns in the nozzle are affected by the length of the inlet cone, the total length of the nozzle and the operating conditions of the nozzle, i.e. inlet pressure and ambient pressure. The nature of the separation flow in the nozzle, and hence the momentum coefficient depends on the degree of expansion of the flow from the shortened nozzle, therefore it is necessary to identify the main geometric and technological parameters of the flows in the shortened nozzle with a bell-shaped tip and determine the dependence of the momentum coefficient on them. Data analysis was carried out on the basis of the STATGRAPHICS Plus program. The influence values of each adopted factor and their mutual influence on increasing the flow impulse characteristics in the shortened nozzle are obtained. Three-dimensional graphs of the dependence of the momentum coefficient on the geometric parameters, the pressure at the nozzle inlet, and the pressure of the external environment were obtained. The formula for the dependence of the impulse coefficient on the length of the conical part, the total length of the nozzle, the pressure at the nozzle inlet and the pressure of the external space was determined. It was established that an increase in the pressure of the external space leads to an increase in the impulse characteristic at the average value of the pressure at the nozzle inlet. The built regression model allows you to choose the optimal contour of a shortened nozzle with a tip.

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

Сироткіна Наталія Петрівна – молодший науковий співробітник Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України.

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

Syrotkina Nataliya Petrivna - junior researcher, Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine.

В.С. Михайленко, А.В. Каменева, С.А. Стукалов, О.М. Зуй
**МОДЕЛЮВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ СИСТЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ
ТА КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНІЧНОГО ОБ'ЄКТА**

Анотація. У статті проводиться аналіз ефективності роботи нейромережевої системи управління змістом лужності (РН) у поживній воді парового котла. Інтелектуальна система управління реалізує принцип зворотного проходження похибки через нейроемулятор. Як об'єкт дослідження використовувалася модель підсистеми продувки водотрубного парового котла. Об'єктів управління характеризуються частотою зміною режимів роботи та впливом зовнішніх збурень. Навчання нейромережевого контролера та нейроемулятора проводилося на моделі САУ з ПІД-регулятором за методикою експертного коригування настроювальних коефіцієнтів: пропорційності, сталої інтегрування та диференціювання на основі аналізу показників якості перехідного процесу. Зміна значень параметрів моделі об'єкта по каналах керування та збурення відповідала динамічним режимам роботи парового котла в широкому діапазоні парового навантаження. Аналіз перехідних процесів отриманих на основі імітаційного моделювання дозволяє стверджувати, що навчена нейромережева система управління успішно компенсує збурення на широкому діапазоні зміни значень параметрів об'єкта по каналах управління і збурення (імітація зміни парового навантаження).

Ключові слова: система автоматичного управління; нейромережевий контролер, ПІД-регулятор; паровий котел; перехідний процес.

Вступ. Ідентифікація динамічних об'єктів технічних систем є одним із основних завдань адаптивних систем автоматичного управління, для вирішення яких, поряд з безліччю різних методів, можуть бути застосовані нейронні мережі. Відомо, що ідентифікація складного технічного об'єкта сильно ускладнена при впливі шумів і перешкод в умовах, коли ряд контрольованих параметрів об'єкта змінюються через вплив різного виду впливів, що задають і обурюють. У разі для параметричної ідентифікації динамічних об'єктів виправданим може бути використання нейронних мереж [1]. В даний час пропонується безліч типів нейронних мереж з різними алгоритмами навчання, що застосовуються під час ідентифікації динамічних об'єктів управління [2]. При цьому не всі вони можуть оптимально підходити для використання в системах ідентифікації параметрів

ряду складних технічних об'єктів. Таким чином, актуальною є задача аналізу ефективності найбільш відомих типів нейронних мереж адаптивних САУ параметрами технічного об'єкта.

Постановка проблеми. Відомо, що якість поживної води в парових котлах дуже важлива, оскільки від цього залежить ефективність роботи котельні, а також можливість вирішення безлічі завдань в області безпечної роботи парового обладнання та всієї котельні. Від якості рідини, яка використовується для утворення пари в котлах, залежать такі критерії роботи обладнання, як [3]:

- накипівтворення. При підвищеній жорсткості водного середовища та відсутності контролю цього стану на теплообмінних площинах утворюватиметься накип. Накип знижуватиме ефективність обладнання, і знижуватиме тепловіддачу;

- іржавіння обладнання та труб, а також хімічні процеси, що протікають. При перевищенні концентрації газів у водному середовищі (частіше кисню) прискорюватимуться корозійні процеси на металевих деталях устаткування. При низькій кислотності водного середовища корозія може поширитись на значній поверхні котла. При лужному середовищі води виходитиме багато піни, може виникати лужне розтріскування і крихкість сталевих деталей агрегату.

Для зниження представлених процесів використовуються САУ продування.

При цьому підтримка загального вмісту солі в котловій воді в межах норми здійснюється за допомогою безперервних і періодичних продувок з барабана в спеціальні розширювачі. Втрати води з продуванням заповнюються поживною водою у кількості, що визначається рівнем води в барабані. Безперервне продування служить для видалення надлишку солей, що накопичуються в котловій воді в процесі пароутворення. Витрата води на безперервне продування залежить від способу водопідготовки і коливається в межах 0,5 - 3% максимальної продуктивності котла і в межах 2 - 5% при пуску [3].

У типових системах автоматизації процесу продування поживної води використовується ПД – регулятор. Даний контролер успішно працює в умовах постійного теплового навантаження, але в умовах приватної зміни парового навантаження, контролер допускає перевищення вмісту лужності (РН) та солевмісту так як вимагає зміни налаштувальних параметрів алгоритму керування.

Таким чином, виникає актуальна виробнича проблема розробки адаптивної САУ продування, здатної в умовах впливу динамічних збурень довго підтримувати значення лужності та солевмісту в допустимих межах.

Аналіз публікацій у галузі дослідження. Останнім часом теорія нейроуправління набуває широкого поширення у різних виробничих та соціальних сферах. Разом з тим, можна відмітити роботи у сфері паралельної нейромережевої ідентифікації [4-7].

Ідентифікацію динамічного об'єкта, що отримує на вхід у момент часу t вектор вхідних параметрів $u(t)$, що має на виході вектор $y(t)$, можна розглядати як знаходження типу моделі цього об'єкта, з виходом $\hat{y}(t)$, і параметрів даної моделі, що задовольняють умові мінімізації помилки $e = y(t) - \hat{y}(t)$ цієї моделі (Рис.1). Нехай задана послідовність векторів вхідних ознак $u(t), t \in [0, T]$, і послідовність векторів виходів $y(t), t \in [0, T]$, де T - число дискретних відліків контрольованого параметра. Розглянемо рішення задачі ідентифікації, як визначення виду функції f :

$$y(t) = f[y(t-1), \dots, y(t-n_y], u(t), u(t-1), \dots, u(t-n_u)],$$

де $y(t)$ - вектор виходів моделі, $n_y < T, n_u < T, .$

Схема ідентифікації, що розглядається, називається послідовно-паралельною, в кожен момент часу на вхід моделі подаються відомі вимірні значення вхідного і вихідного сигналів об'єкта [5].

Будемо розглядати рішення завдання у вигляді:

$$y(t) = f[y(t-1), \dots, y(t-n_y], u(t), u(t-1), \dots, u(t-n_u)],$$

де $y(t) = y(0), y(t)$ - вектор виходів моделі, $n_y < T, n_u < T$. Таку схему ідентифікації, називають паралельною, у кожний момент часу на вхід моделі подаються вимірні значення вхідного сигналу об'єкта і виходи моделі в попередні моменти часу.



Рисунок 1 - Схема ідентифікації динамічного об'єкта [4]

Розглянемо нейронну мережу (НС), яка може бути використана для ідентифікації динамічних систем [4]. Вектор вхідних ознак $u(t)$ цієї мережі поділено на дві частини: $x^{in}(t), x^{out}(t)$. Перша частина вхідних ознак $x^{in}(t)$ містить інформацію про входи динамічного об'єкта та його попередні виходи. Друга частина вектора вхідних ознак $x^{out}(t)$ містить інформацію про передба-

чуваний вихід даного динамічного об'єкта, що відповідає входам $x^{in}(t)$. Вектор ваги розділений аналогічним способом [4]. Таким чином,

$$x(t) = \begin{pmatrix} x^{in}(t) \\ x^{out}(t) \end{pmatrix} \text{ і } w(t) = \begin{pmatrix} w^{in}(t) \\ w^{out}(t) \end{pmatrix}, \text{ де } w_i(t) - \text{вектор ваг } i\text{-го нейрона, } w_i^{in}(t) -$$

частина вектора ваг, що містить інформацію про входи процесу, а $w_i^{out}(t)$ - частина вектора ваг, що містить інформацію про виходи процесу. Перша частина вектора вхідних ознак містить інформацію про входи процесу та його попередні виходи:

$$x^{in}(t) = (y(t-1), \dots, y(t-n_y), u(t), u(t-1), \dots, u(t-n_u)),$$

де $n_y < T, n_u < T$. Друга частина вектора вхідних ознак $x^{out}(t) = y(t)$ містить інформацію про передбачуваний вихід даного процесу, що відповідає входам $x^{in}(t)$. Кожен приклад вибірки складається з кількох векторів $(y(t), u(t))$ і вибірка повинна містити не менше $\max(n_u, n_y)$ прикладів. Вектора $y(t)$ являють собою вектор входів процесу в момент часу t , а $u(t)$ – вектор виходів цього процесу в той же момент часу.

Основной материал. Об'єктом регулювання є ділянка парового котла, що включає вимірювальний перетворювач лужності РН, і ділянка, що включає трубопроводи та вимірювальний перетворювач витратоміра продувної води. Об'єкт управління є інерційним і в основному визначається динамічними характеристиками датчика РН з функцією передачі передавальної ланки із ланкою транспортного запізнення. За своїми динамічними властивостями досліджувана ділянка регулювання типова для теплових інерційних об'єктів. Час запізнення $\tau_{при}$ при нанесенні обурення витратою пари визначається в основному інерційністю вимірювальних пристроїв і становить 0.5 - 2 хв, постійна часу $T_{об} = 25 - 400$ с, коефіцієнт посилення по каналу управління $K = 0,5 - 15$ РН % ходу регулюючого органу [8]. Діапазон параметрів передавальних функцій залежить від поточного парового навантаження котла. Аналіз основних каналів збурень, що надаються на функціонування САУ продування (рис. 2), дозволяє виділити найбільш несприятливі з них [8]:

- Зміна парового навантаження (витрати пари);
- Зміна кількості пари над дзеркалом випаровування;
- Зміна рівня води в барабані;
- Зміна хімічного складу поживної води;
- Зміна витрати поживної води.

Автоматичне регулювання безперервного продування здійснюється шляхом впливу ПІД - регулятора на регулюючий клапан на лінії продування поживної води парового котла (див. Рис. 2).

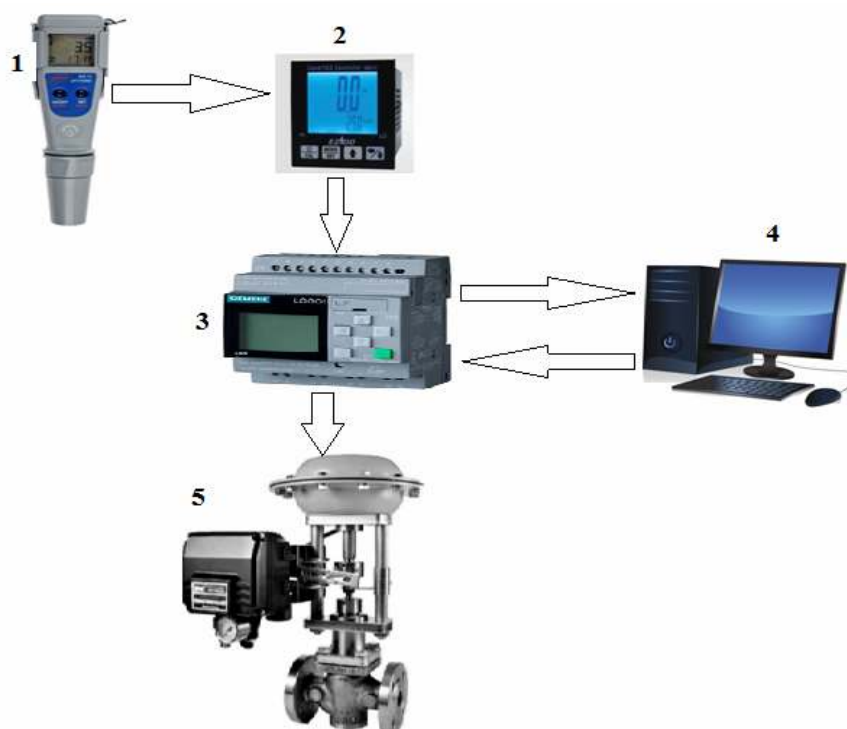


Рисунок 2 - Схеми САУ продування

На рис. 2: 1 - рН метр (датчик марки Ezodo), 2 - показує прилад, 3 - ПІД - контролер, 4 - робоче місце оператора, 5 - регулюючий пристрій.

За допомогою НС можна ідентифікувати як об'єкт управління, так й регулятор, оскільки останній може бути описаний типовими ланками. НМ, що імітує роботу ПІД – регулятора також може замінити і оператора в контурі управління, коли робота відбувається в небезпечних умовах або для виключення помилок через втому, недосвідченість тощо.

Для заміни існуючого регулятора (або оператора) неймережевою моделлю (Рис. 3) в режимі on line слід у певні моменти часу зчитувати з датчиків (рН) сигнали з входу ПІД - регулятора (тобто помилка $e(t)$ або опис стану об'єкта $x(t)$) та з його виходу – сигнал управління $u(t)$. Опис стану подається на вхід НМ, а опис сигналу управління використовується для розрахунку поточної помилки виходу НМ. Алгоритм зворотного поширення помилки [5] дозволяє мінімізувати її:

$$e_u(t) = u_m(t) - u(t).$$

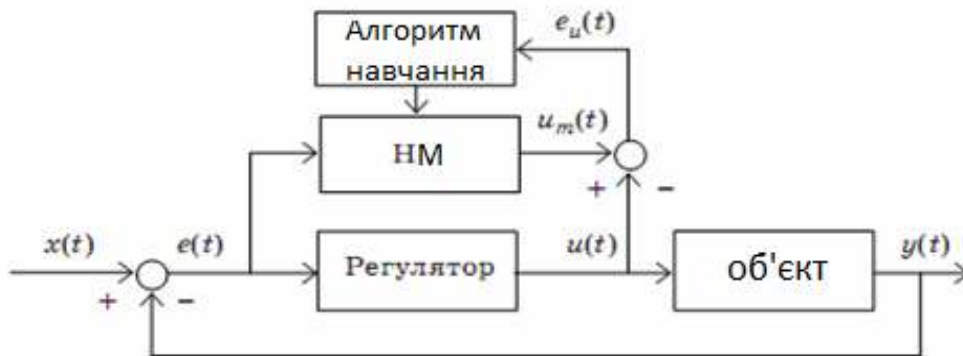


Рисунок 3 - Навчання НМ у режимі on line

При навчанні в режимі offline за допомогою моделі діючого ПІД-регулятора створювалася навчальна вибірка, і НМ навчалася за цією вибіркою (Рис.4). Для навчання НМК (нейромережевого контролера) було проведено експеримент із типовим ПІД – регулятором (Рис. 4.). В якості об'єкту виступає інерційна ланка. ПІД-регулятор налаштований каналом управління (Рис.4.), експеримент проводився у комп'ютерному середовищі Simulink [9]. ПІД контролер адаптуватиметься під зміни властивостей керованого об'єкта. Варіюванням значень $T_{об}$ і $K_{об}$, передбачається ініціювати зміни значень параметрів ПІД - регулятора K_p, T_i, T_d , тобто адаптувати їх з метою досягнення очікуваного перехідного процесу. Процес навчання НМ, що імітує ПІД - регулятор показаний на рис.5.

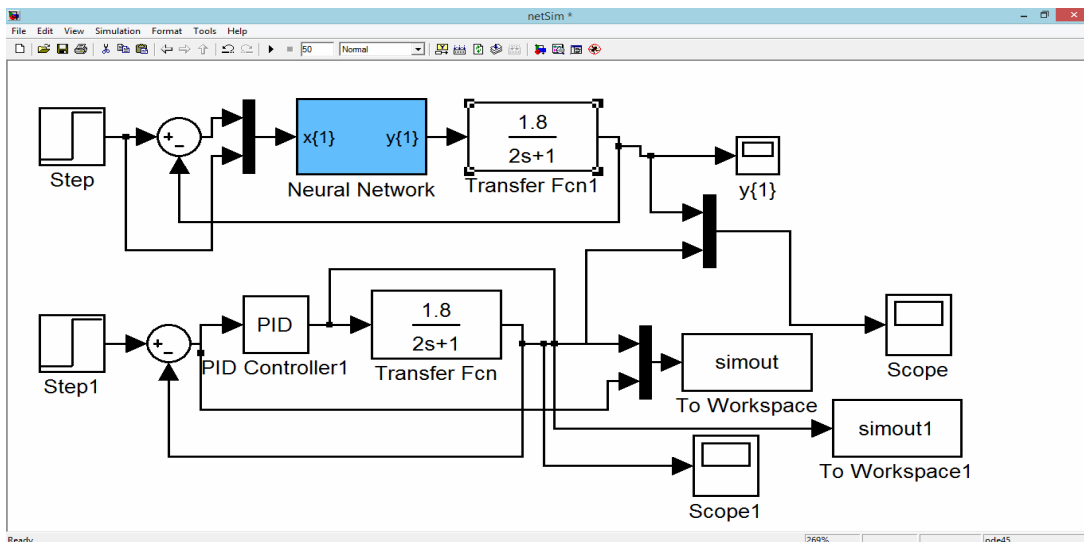


Рисунок 4 - Схема імітаційного моделювання нейростевої САУ на основі збору даних про роботу ПІД – регулятора

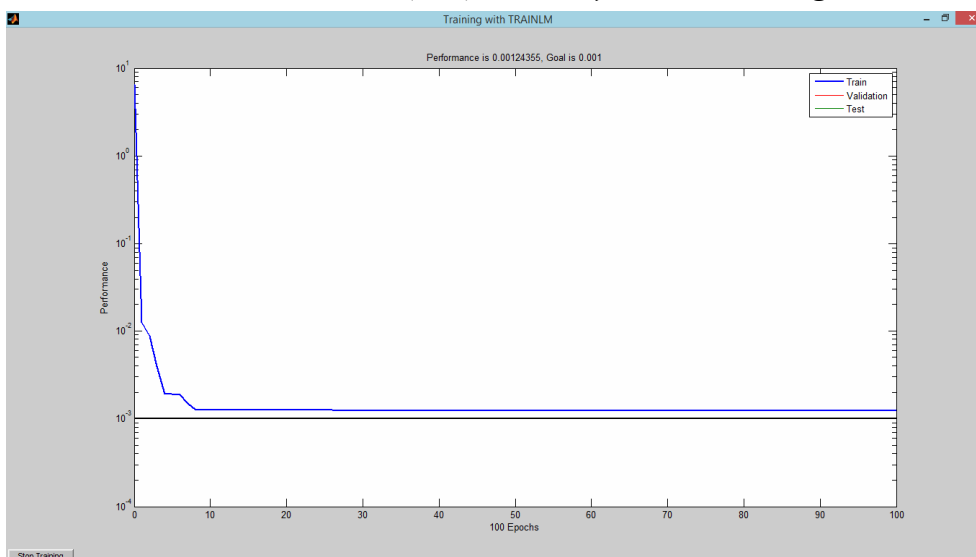


Рисунок 5 - Процес навчання нейронної мережі

За допомогою імітаційного моделювання типової та нейромережевої САУ були отримані перехідні процеси стабілізації значення РН у продувальній воді парового котла. (Рис. 6).

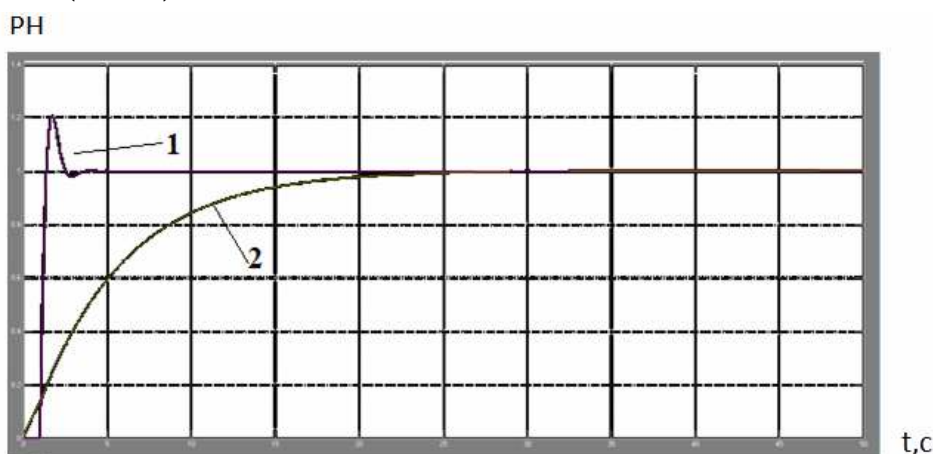


Рисунок 6 - Перехідні процеси САУ лужності з ПІД (1) та нейромережевим (2) регуляторами по каналу управління

На підставі аналізу показників якості перехідних процесів (часу регулювання T_p і першого відхилення) можна вказати, що нейромережевий регулятор має більшу тривалість часу регулювання (за рахунок затримки сигналів) і відсутність закидання.

Для аналізу адаптивних можливостей нейромережевого регулятора або нейромережевого контролера (НСК) був проведений другий імітаційний експеримент з додаванням моделі каналу зовнішнього обурення (витрата пари) (Рис.7).

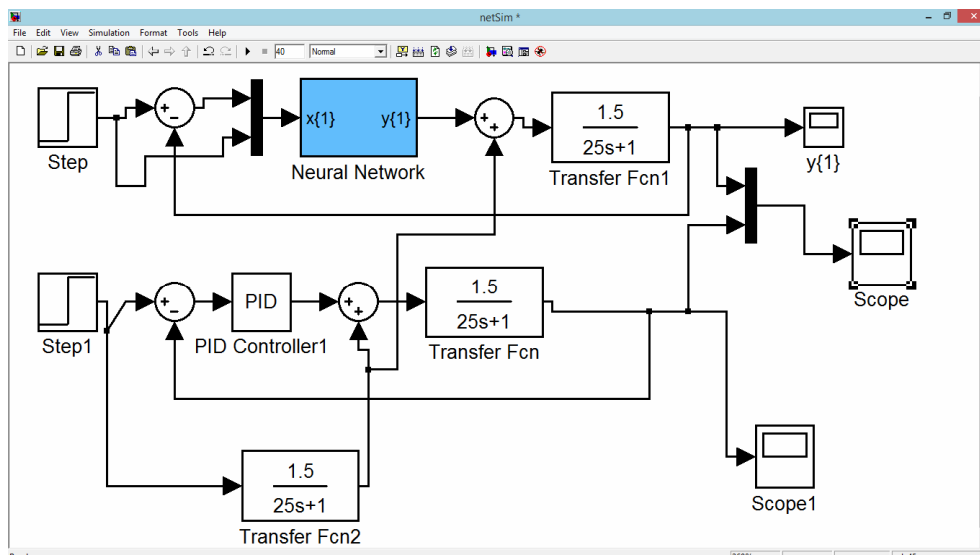


Рисунок 7 - Схема імітаційного моделювання типової та нейромережевої САУ із введенням каналу зовнішнього обурення (витрата пари)

Перехідні процеси САК з ПІД та НСК показані на рис. 8.

PH

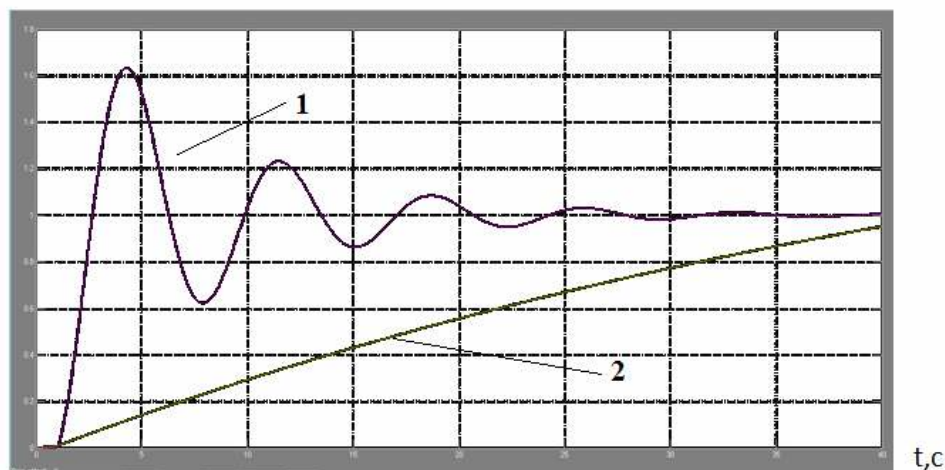


Рисунок 8 - Перехідні процеси САУ лужності з ПІД (1) та нейромережевим (2) регуляторами по каналу управління при впливі обурення

Встановлено, що синтезований таким способом нейромережевий регулятор не може працювати набагато краще за свій прототип (ПІД) і вимагає додаткового навчання на основі тривалої адаптації типового ПІД – регулятора. Отже, для підвищення якості процесу управління запропоновано застосовувати інші підходи.

Розглянемо метод зворотного пропуску помилки через нейроемулятор [10], який ґрунтується на ідеї застосування тандему з двох нейронних мереж, одна з яких виконує функцію контролера, а друга прямого нейроемулятора, який навчається моделювати динаміку об'єкта управління (рис. 9). У процесі

навчання нейроконтролера поточна помилка управління пропускається через нейроемулятор у зворотному напрямку. При навчанні прямого нейроемулятора, на вхід об'єкта управління подається випадковий сигнал u , що змінює положення об'єкта управління y , і формується навчальна вибірка. Навчання прямого нейроемулятора виконується офф-лайн. Нейроемулятор вважається навченим, якщо при однакових значеннях на входах нейроемулятора та реального об'єкта, відмінність між значеннями їх виходів стає незначною. Після закінчення навчання прямого нейроемулятора проводиться навчання нейроконтролера. Навчання виконується в режимі он-лайн за такою самою схемою, як і у разі інверсного спеціалізованого нейроуправління. На схемі моделі для введення в контролер затриманих даних зворотного зв'язку використовуватиметься модуль лінії затримок TDL. Механізм зворотного проходження помилки через прямий нейроемулятор реалізує локальну інверсну модель у точці простору станів об'єкта управління. Проїшовши через нейроемулятор, помилка далі поширюється через нейроконтролер, але тепер її проходження супроводжується корекцією вагових коефіцієнтів нейроконтролера. Нейроемулятор виконує функції додаткових шарів нейронної мережі нейроконтролера [11].

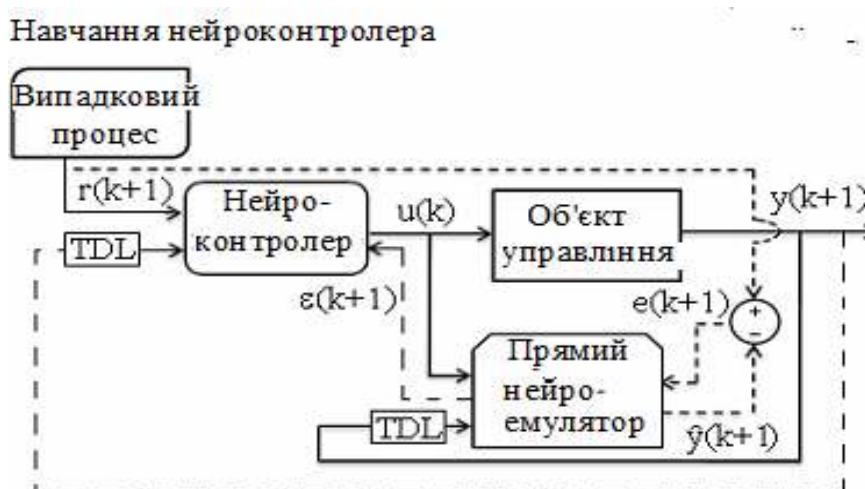


Рисунок 9 - Схема нейромережевої САУ з нейроемулятором

Для отримання розширеної тестової вибірки використовується підстроювання математичної моделі об'єкта управління під впливом зовнішнього збурення. Так значення постійної часу об'єкта $T_{об}$ змінюються, залежно від навантаження на об'єкт і впливу внутрішнього обурення – зміна складу реагенту, у наступному діапазоні (5;25;45;105). Відповідно, оператор змінює значення налаштувань ПІД – регулятора для отримання оптимального

перехідного процесу. В якості навчальної вибірки для нейроемулатора (НЕ) використовуються значення сигналів неузгодженості (e) - входи в НСК, і значення керуючого впливу (u) виміряні на виході ПІД - регулятора, будуть вихідними значеннями НЕ. Провівши імітаційний експеримент у програмі MatLab, отримали такі дані (табл. 1)

Таблиця 1

Фрагмент навчальної вибірки для НЕ

$T_{об}$	5	25	45	105
E	0,000422	0,00069	0,096	0,049
U	3,333	3,335	3,353	1,995

Таким чином, дані табл.1 являють собою вхідний та цільовий вектори НСК. Використовуючи команди програми MatLab, створимо НР (Рис. 10) та протестуємо її:

```
>>neural
>>e = [0.000422 · 0.00069 · 0.096 · 0.049];
>>u = [3.333 · 3.335 · 3.353 · 1.995];
>>net = newlind(e,u);
>>y = sim(net,e)
y = 3.0935 3.0928 2.8566 2.9731
>>gensim(net,-1)
```

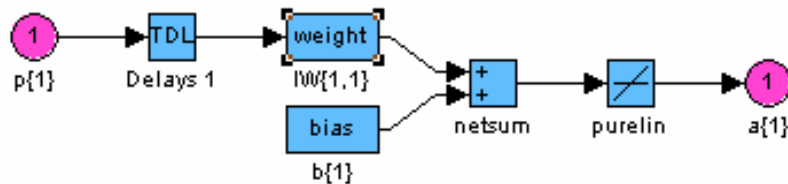


Рисунок 10 - Фрагмент структури нейрона НЕ

Правила перетворення сигналів визначаються математичною моделлю нейрона, яка представлена у формі наступних аналітичних виразів [10]:

$$s = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b, y = f(s),$$

де w_i – вага синапсу $i \in (1,2,...,n)$; b – значення зміщення, s – результат підсумовування, x_i – вектор вхідного сигналу ($i \in (1,2,...,n)$); $f(s) = k \cdot s$ – лінійна функція активації. Для нашого прикладу: $w = -2,48$; $b = 3,094$; $k = 1$, синаптична зв'язь являється тормозящей.

В результаті навчання НМ необхідно забезпечити:

- формування правильних вихідних сигналів відповідно до всіх прикладів навчальної вибірки;
- формування правильних вихідних сигналів відповідно до всіх можливих вхідних сигналів, які не увійшли до навчальної вибірки.

Імітаційне моделювання САУ (Рис. 11) проведено в середовищі Neural Network Toolboxes (MatLab). Аналіз процесу регулювання (Рис. 12) показав: перше відхилення $\Delta y_1 = 0.5$; час регулювання – $T_p = 25$ с. Показники якості відповідають очікуванім.

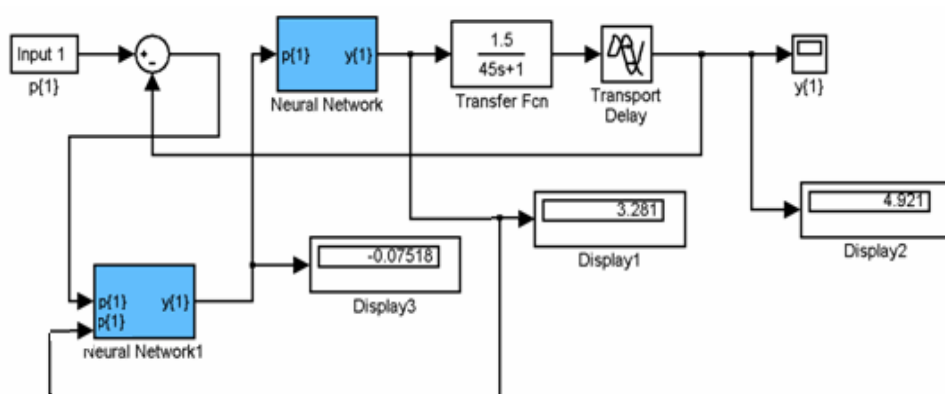


Рисунок 11 - Імітаційна модель нейромережевого керування (НСУ)

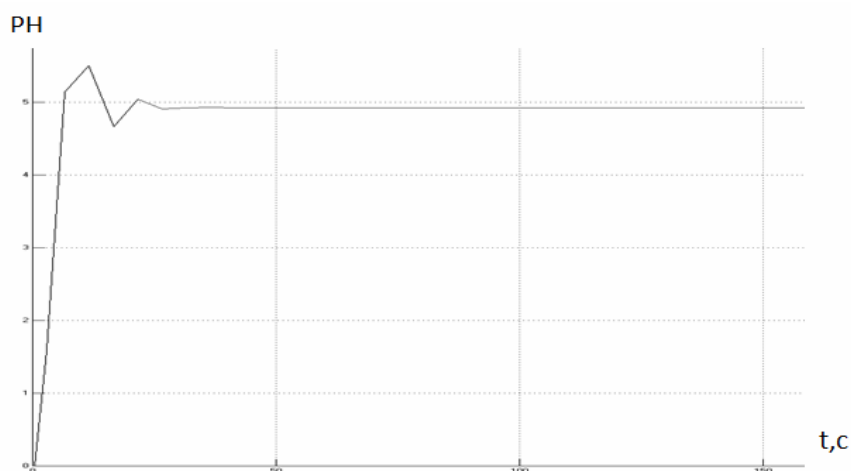


Рисунок 12 - Перехідний процес НСУ змісту лужності каналом управління

Подальші експерименти показали, що зі збільшенням постійної часу об'єкта $T_{об}$ у випадковому порядку з діапазону (45 – 355 с), НСУ успішно підтримує задане значення зі збільшенням часу регулювання до 200 с, що відповідає вимогам до САУ продувки. Також, НСУ не потребує подальшого навчання так як адекватно пристосований до впливу зовнішніх та внутрішніх збурень (Рис. 13).

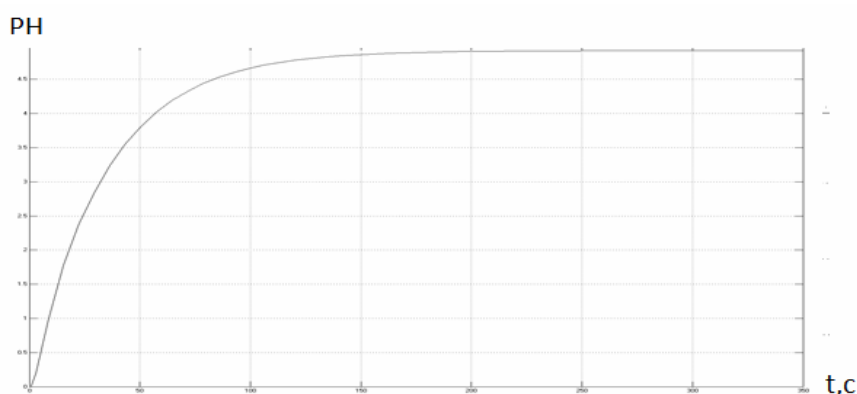


Рисунок 13 - Перехідний процес НСУ лужності у поживній воді котла каналом управління

Висновок. Слід зазначити, що НСУ з нейроемулятором успішно підтримує зміни завдання та постійної часу (сигнальне та параметричне обурення) та не потребує переналаштування своїх параметрів на відміну від ПІД – регулятора. Проте, при зменшенні значень постійної часу об'єкта тобто зменшення інерційності об'єкта ($T_{об} = 35$ с) НСУ перетворюється на автоколивальний режим. Наразі простежуються недоліки системи самонавчання з нейроемулятором (НЕ), що пов'язані з неможливістю врахування впливу глибоких внутрішніх збурень так як всі можливі ситуації зміни значень параметрів об'єкта заздалегідь передбачити складно. Однак, за дотриманням вимог технічного регламенту, можна відзначити можливість ефективної роботи запропонованої структури нейромережевого управління об'єктами при впливі обурень, що контролюються, і зміни теплового навантаження парового котла в режимному діапазоні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zhang Y. Neural network-based PID predictive control for nonlinear time-delay systems / Y. Zhang, Z.Q. Chen, P. Yang, Z.Z. Yuan // Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Vol. 2. 2017. P. 1014 – 1018.
2. Yongquan Y.A. PID neural network controller/ Y.A.Yongquan, H.Ying, Z.Bi // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks. Vol. 3. 2017. P. 1933 – 1938.
3. Ключев А.С. Налагодження систем автоматичного регулювання парових котлоагрегатів / А.С. Ключев, А. Г. Товарнов. М.: Енергія, 1970.– 270 с.
4. Ho S.J. Optimizing fuzzy neural networks for tuning PID controllers using an orthogonal simulated annealing algorithm OSA/ S.J. Ho, L.S. Shu, S.Y. Ho / IEEE Transactions on Fuzzy Systems. Vol. 14. Issue 3. 2016. P. 421 –434.

5. Yang P. Neural networks internal model control for water level of boiler drum in power station / P.Yang, D.G.Peng, Y.H. Yang, Z.P. Wang // Proceedings of 2017 International Conference on Machine Learning and Cybernetics.Vol. 5. 2017. P. 3300 – 3303.
6. Михайленко В.С. Синтез нейромережевої системи автоматичного регулювання рівня води в барабані котла енергоблоку ТЕС / Михайленко В.С., Харченко Р.Ю. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2012. – №5. – С. 45 – 51.
7. Sen P. Adaptive Neural Controller/ P.Sen, G.E. Hearn, Y. Zhang // In Neural Network Systems Techniques and Applications. Hrsg. Leondes C.T. 1998.- Vol.4.- P. 274 - 343.
8. Boiler Operating Mistakes On Ships That Can Cost Big Time. URL: <https://www.marineinsight.com/tech/boiler>.
9. Artificial Neural Network and Machine Learning using MATLAB // <https://www.udemy.com>.
10. Yongquan, Y.A. PID neural network controller / Y.A.Yongquan, H. Ying, Z. Bi // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks.Vol. 3. 2017. P. 1933 – 1938.
11. Mikhailenko V.S. Analysis of Traditional and Neuro Fuzzy Adaptive System of Controlling the Primary Steam Temperature in the Direct Flow Steam Generators in Thermal Power Stations / V. S. Mikhailenko, R. Yu. Kharchenko. // Automatic Control and Computer Sciences – 2014. – Vol. 48, №. 6. – P. 334 –344.

REFERENCES

1. Zhang Y. Neural network-based PID prediktivní kontrol' dlya neliniynykh time-delay systems / Y. Zhang, Z.Q. Chen, P. Yang, ZZ. Yuan // Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics.Vol. 2. 2017. P. 1014 - 1018.
2. Yongquan Y.A. PID neural network controller/ Y.A.Yongquan, H.Ying, Z.Bi // Protsedury mizhnarodnoho menedzhmentu na Neural Networks.Vol. 3. 2017. P. 1933 - 1938.
3. Klyuyev O.S. Nalahodzhennya system avtomatychnoho rehulyuvannya parovykh kotloahrehativ / O.S. Klyuyev, A. H. Tovarnov. M.: Enerhiya, 1970. - 270 s.
4. Ho S.J. Optimizing fuzzy neural networks dlya tuning PID controllers vykorystovuyuchy ortohonal'ni simulated annealing algorithm OSA/ S.J. Ho, L.S. Shu, S.Y. Ho / IEEE Transactions on Fuzzy Systems.Vol. 14. Issue 3. 2016. P. 421 -434.

5. Yang P. Neural networks internal model control for water level of boiler drum in power station / P.Yang, D.G.Peng, Y.H. Yang, ZP. Wang // Proceedings of 2017 International Conference on Machine Learning and Cybernetics.Vol. 5. 2017. P. 3300 - 3303.
6. Mykhaylenko V.S. Syntez neyromerezhevoyi systemy avtomatychnoho rehulyuvannya rivnya vody v barabani kotla enerhobloku TES / Mykhaylenko V.S., Kharchenko R.YU. // Naukovi visti NTUU «KPI». - 2012. - №5. - S. 45 - 51.
7. Sen P. Adaptive Neural Controller/P.Sen, G.E. Hearn, Y. Zhang // In Neural Network Systems Techniques and Applications. HRSG. Leondes C.T. 1998. - Vol.4. - R. 274 - 343.
8. Boiler Operating Mistakes On Ships That Can Cost Big Time. URL: <https://www.marineinsight.com/tech/boiler>.
9. Artificial Neural Network and Machine Learning using MATLAB// <https://www.udemy.com>.
10. Yongquan, Y.A. PID neural network controller / Y.A.Yongquan, H. Ying, Z. Bi // Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks.Vol. 3. 2017. P. 1933 - 1938.
11. Mikhaylenko V.S. Analysis of Traditional and Neuro Fuzzy Adaptive System of Controlling the Primary Steam Temperature in Direct Flow Steam Generators in Thermal Power Stations / V. S. Mikhailenko, R. Yu. Kharchenko. // Automatic Control and Computer Sciences - 2014. - Vol. 48 №. 6. - R. 334 -344.

Received 31.03.2023.
Accepted 03.04.2023.

Modeling of a neural network-based system for identification and control of technical object parameters

The article analyzes the effectiveness of a neural network control system for maintaining the pH level in the feedwater of a steam boiler. An intelligent control system implements the principle of reverse error propagation through a neural emulator. The subsystem model of steam boiler water tube blowing was used as the research object. The neural network controller and neural emulator were trained on a control system model with a PID controller using the expert correction methodology of tuning coefficients: proportionality, integration constant, and differentiation based on the analysis of transient process quality indicators. The analysis of the transient processes obtained from simulation modeling allows us to state that the trained neural network control system successfully compensates for disturbances over a wide range of changes in the object's parameter values via control channels and disturbances (simulating changes in steam load).

Михайленко Владислав Сергійович - доктор технічних наук, професор, Національний університет «Одеська морська академія».

Каменєва Алла Вікторівна - кандидат технічних наук, доцент, доцент, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова.

Стукалов Сергій Анатолійович - старший викладач, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова.

Зуй Оксана Миколаївна – викладач, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова.

Mykhailenko Vladyslav - Doctor of Technical Sciences, Professor, National University "Odesa Maritime Academy".

Kamienieva Alla - PhD, Associate Professor, Odesa I.I. Mechnykov National University.

Stukalov Segii - Senior Lecturer, Odesa I.I. Mechnykov National University.

Zui Oksana – teacher Odesa I.I. Mechnykov National University.

АНАЛІЗ УРАЗЛИВОСТЕЙ ТА ПРОБЛЕМ БЕЗПЕКИ ВЕБЗАСТОСУНКІВ

Анотація. Поширеність порушень безпеки сайтів та вебзастосунків зробило тестування безпеки невіддільною складовою життєвого циклу розробки відповідного ПЗ. Пошук ефективних шляхів щодо мінімізації ризиків та вразливостей безпеки вебзастосунків є вельми актуальним. У статті проведено комплексний аналіз уразливостей, методів, інструментів та проблем, з якими стикається тестування безпеки вебзастосунків. З'ясовано, що до списку найпоширеніших уразливостей вебзастосунків увійшли: порушений контроль доступу, криптографічні збої, неправильна конфігурація безпеки, SQL та іншого роду ін'єкції, незахищений дизайн, помилки ідентифікації й автентифікації тощо. Виділено особливості специфіки уразливостей безпеки вебзастосунків. Окремо розглянуто проблеми, з якими стикаються автоматизовані інструменти для тестування веб-безпеки.

Ключові слова: тестування безпеки, вебзастосунок, безпека вебзастосунків, уразливості безпеки, інструменти тестування.

Постановка проблеми. Сьогодні наявність стабільного і безпечного доступу до інтернет-ресурсів став життєво важливим для більшості нашого соціуму. Це стосується можливості працівників широкого спектра професій віддалено виконувати свої службові обов'язки, учнів та студентів – дистанційно навчатися і мати доступ до навчальних матеріалів, споживачів у всьому світі – вибирати онлайн товари та послуги засобами того чи іншого сайту чи то вебзастосунку.

Нині за умов розповсюдження кіберзлочинів та проведення цілеспрямованих інформаційних війн вебресурси повсюдно піддаються атакам різного масштабу і складності з метою впливу на конфіденційність, цілісність і доступність даних інформаційних систем. Поширеність порушень безпеки сайтів та вебзастосунків, а також важливість їх запобігання зробило тестування безпеки невіддільною складовою життєвого циклу розробки відповідного ПЗ, що має виявляти вразливості, пов'язані із забезпеченням цілісного підходу до захисту програми від хакерських атак, вірусів, несанкціонованого доступу до конфіденційних даних.

Тестування веббезпеки перевіряє бізнес-логіку, проблеми автентифікації та авторизації, кодування вхідних і вихідних даних, а також інші можливі ризики, щоб виявити уразливі місця в безпеці і переконатися, що всі функції вебзастосунків безпечні. Для тестування безпеки важливо враховувати різницю між ризиком та ефективністю розроблених тестів безпеки щодо пом'якшення відповідного ризику безпеки для аналізу рентабельності інвестицій у безпеку [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізу проблем тестування, усунення помилок та забезпечення безпеки вебпрограм присвячені численні дослідницькі публікації. У дослідженні [2] проаналізовано сукупність знань 80-ти технічних статей, пов'язаних із тестуванням безпеки вебзастосунків, опублікованих з 2005 по 2020 рік. У роботі [3] виявлено 69 проблем, з якими стикаються розробники та користувачі вебпрограм, запропоновано ієрархічну структуру для визначення та категоризації таких проблем, проте не з'ясовані специфіка та проблеми тестування безпеки. Автори статті [4] стверджують, що тестування залежить від технологій впровадження, тому методи тестування мають відстежувати всі проблеми при розробленні стратегії тестування та адаптуватися до динамічно поширеної природи Інтернету. У роботі [5] запропоновано таксономію методів тестування безпеки з 3-х основних категорій (ідентифікація, тестування та звітність) і 17-ти підкатегорій, що складаються з конкретних методів тестування безпеки (наприклад, тестування чорної, білої та сірої скриньок, оцінка ризиків тощо). У роботі [6] наголошено на тому, що для забезпечення безпеки вебсайту потрібен аналіз його уразливостей, відповідно до стандартизації безпеки Open Web Application Security Project (OWASP). Проведений аналіз публікацій виявив значну зацікавленість у пошуку ефективних шляхів щодо мінімізації ризиків та вразливостей безпеки сайтів.

Мета дослідження: проаналізувати й узагальнити уразливості та проблеми, з якими стикається тестування безпеки сайтів і вебзастосунків.

Викладення основного матеріалу дослідження.

1. Аналіз уразливостей безпеки вебзастосунків. Для проведення тестування безпеки вебзастосунків тестувальник безпеки (Pentester або AppSec Engineer), окрім впевненого володіння декількома мовами програмування зі списку найпоширеніших фреймворків, має розбиратися в протоколах передачі даних, знати операційні системи Windows/Unix на рівні адміністратора, а також практики DevSecOps/AppSec з різними підходами до їх застосування, вміти налаштовувати та адмініструвати поширені інструменти CI/CD, мати навички

скриптингу для автоматизації завдань. Але головним для таких фахівців є знання векторів атак (на різних рівнях), методів обходу захисту на рівні застосунків та засобів їх захисту, володіння прийомами виявлення та усунення поширених уразливостей, вміння роботи з інструментами аналізу та оцінки уразливостей і рівня захищеності. Відтак фахові вимоги до рівня компетентностей Pentester дуже високі, особливо, якщо враховувати необхідність постійного саморозвитку і відстеження появи нових інструментів тестування безпеки та вивчення оновлень функціоналу у наявних. Pentester має перевіряти стійкість захисту ПЗ від різних невизначених атак, адже будь-яка уразливість може стати потенційно критичною загрозою для працездатності програми.

Щоб полегшити роботу фахівців з тестування безпеки, відкрита некомерційна організація з безпеки програмного забезпечення в Інтернеті OWASP (Open Web Application Security Project) досліджує та кожні кілька років оновлює список найпопулярніших уразливостей вебзастосунків. 2021 року до цього списку увійшли [7]: порушений контроль доступу, криптографічні збої, неправильна конфігурація безпеки, SQL та іншого роду ін'єкції, незахищений дизайн, помилки ідентифікації та автентифікації тощо.

Аналіз специфіки найпоширеніших нині уразливостей безпеки вебзастосунків показав такі їхні особливості:

1) *порушений контроль доступу* нині є доволі поширеною уразливістю безпеки вебзастосунків. Збої контролю доступу зазвичай призводять до несанкціонованого розголошення інформації, модифікації чи знищення даних або виконання бізнес-функцій за межами обмежень користувача. Найбільше випадків зламу контролю доступу відбувається через [8]: порушення принципу привілеїв користувачів, обхід перевірок контролю доступу через змінення URL-адреси, дозвіл на перегляд або редагування стороннього облікового запису шляхом надання його унікального ідентифікатора (незахищені прямі посилання на об'єкти), доступ до API із відсутніми елементами керування доступом для POST, PUT і DELETE, маніпуляції метаданими, файлами cookie або прихованими полями для підвищення привілеїв, неправильна конфігурація CORS, що дозволяє отримати доступ до API з неавторизованих/ненадійних джерел, тощо;

2) *криптографічні збої* є головною причиною розкриття конфіденційних даних під час передавання і зберігання. Так, паролі, номери кредитних карток, медичні записи, особиста інформація та комерційна таємниця вимагають додаткового захисту, головним чином, позаяк ці дані підпадають під дію законів про конфіденційність, наприклад, Закону України «Про захист персональних

даних», Загального регламенту про захист персональних даних у межах Європейського Союзу (GDPR) чи то інших нормативних актів і стандартів, наприклад, стандарту безпеки даних індустрії міжнародних платіжних систем (Payment Card Industry Data Security Standard, PCI DSS). Тут важливими чинниками уразливостей є [9]: небезпека зовнішнього інтернет-трафіка, застарілі або слабкі криптографічні алгоритми, методи та протоколи, усталено згенеровані або повторно використані криптоключі, застарілі чи некриптографічні хеш-функції тощо;

3) *ін'єкція* – лідер із найнебезпечніших методів злому, метою яких переважно є отримання даних користувачів, зокрема логінів і паролів, які дадуть змогу авторизуватися у системі з правами якогось користувача. Найпоширенішим видом ін'єкцій є SQL-ін'єкція (SQLi), яка використовує наявні уразливості сайту для відправки шкідливого коду у запитах до сервера бази даних (БД). Для SQL-ін'єкції можуть бути використані будь-які вхідні дані сайту: логін, пароль, ключові слова для пошуку, теги введення, рядки запиту, файли cookie тощо. Іншими видами ін'єкцій є: NoSQL-ін'єкції, міжсайтові сценарії (Cross-Site Scripting, XSS), виконання команд операційної системи (OC), LDAP-ін'єкції (Lightweight Directory Access Protocol), ін'єкції шаблонів (EL, Expression Language), ін'єкції виразів OGNL (Object Graph Navigation Library), ін'єкції XML, XPATH тощо [4]. Так, наприклад, атаки ін'єкцій EL є серйозними вразливостями, які дозволяють зловмисникам витягувати фрагменти інформації (маркери сеансу) або виконувати команди на віддаленому сервері. Тому важливо: шифрувати паролі перед зберіганням їх у БД, не використовувати дані користувача для побудови виразів (створення шаблонів), завжди перевіряти дані, введені користувачем, на боці сервера, а не вставляти їх одразу у запит до БД, і при цьому не обмежуватись перевітками лише на клієнтській стороні. Для запобігання ризиків ін'єкцій доцільний ретельний аналіз вихідного коду та застосування інструментів тестування для виявлення вразливостей до ін'єкцій. Автоматизоване тестування всіх параметрів (заголовків, URL-адрес, файлів cookie, даних JSON, SOAP і XML) різнобічними інструментами тестування безпеки, включаючи статичні (SAST), динамічні (DAST) та інтерактивні (IAST), допомагає виявити введені недоліки ін'єкцій перед розгортанням у робочому середовищі;

4) *незахищений дизайн* – відносно нова категорія ризиків безпеки вебзастосунків, пов'язана з популяризацією використання шаблонів проектування та еталонних архітектур. Ця уразливість стосується відсутності або

неефективності дизайну контролю та недоліків архітектури вебзастосунків, серед яких поширеними є: незахищене або недостатньо захищене зберігання облікових даних, порушення межі довіри, відсутність захисту від ботів, створення повідомлень про помилки, що містять конфіденційну інформацію, тощо. Можливим наслідком використання цієї вразливості може бути, наприклад, спроможність моделювання зловмисниками потоку запитів на групове псевдобронювання квитків або неавтентичне замовлення товарів і, відповідно, значні проблеми і матеріальні збитки. Для запобігання подібного доцільно ретельно підходити до дизайну антиботів і правил логіки домену, варто інтегрувати перевірки правдоподібності на кожному рівні програми (від інтерфейсу до бекенду), слід обмежити користувачам і сервісам доступ до ресурсів, потрібно використовувати бібліотеки безпечних шаблонів проєктування і компонентів, застосовувати засоби контролю безпеки та конфіденційності, використовувати моделювання загроз для критичної автентифікації, контролю доступу, бізнес-логіки та потоків ключів, розробити модульні та інтеграційні тести для перевірки стійкості усіх критичних потоків до моделі загроз і сценаріїв атак;

5) *неправильна конфігурація безпеки* – уразливість, яка стає все більш поширеною через популярність ПЗ з широкими можливостями налаштування. Так, програма може бути уразливою, якщо: неправильно налаштовані дозволи для хмарних служб (наприклад, стандартні дозволи на спільний доступ до Інтернету для інших користувачів хмарних послуг дозволяють отримати доступ до конфіденційних даних, які зберігаються в хмарному сховищі), не використовується сегментована архітектура програм, облікові записи і паролі залишаються усталено активними та не змінюються, відсутній автоматизований процес перевірки ефективності конфігурацій і налаштувань у всіх середовищах, встановлено непотрібний функціонал чи то компоненти (наприклад, непотрібні порти, служби, сторінки, облікові записи або привілеї) і, навпаки, не налаштовано або взагалі вимкнено оновлення функцій безпеки для оновлюваних систем, використовується застаріле, вразливе ПЗ або не встановлено безпечні значення параметрів конфігурації безпеки для серверів, фреймворків, бібліотек, БД тощо;

б) *вразливі та застарілі компоненти* можуть призвести до серйозних наслідків як випадкових (наприклад, помилки кодування), так і навмисних (наприклад, бекдор у компоненті, віддалене виконання коду на сервері). Існують автоматизовані інструменти, які допомагають зловмисникам виявляти невіправлені або неправильно налаштовані системи. Тому важливо забезпечити

ти постійний моніторинг та автоматизоване сканування всіх компонентів (як на боці клієнта, так і на боці сервера) у використовуваних середовищах розробки та своєчасне оновлення конфігурації ПЗ, включаючи ОС, вебсервери, системи керування базами даних (СКБД), API, бібліотеки та всі програмні компоненти середовища виконання. Крім того, варто одразу видаляти невикористовувані компоненти (фреймворки, бібліотеки) та їхні залежності, функції, файли та документацію. Щоб зменшити ймовірність долучення модифікованих шкідливих компонентів (як клієнтських, так і серверних), рекомендовано завантажувати їх лише з офіційних джерел через безпечні посилання та підписатися на сповіщення про вразливості безпеки використовуваних компонентів;

7) *помилки ідентифікації та автентифікації* є поширеними для сценаріїв атак. Уразливості автентифікації ПЗ можуть бути викликані різними причинами, серед яких: дозвіл задавати слабкі або поширено відомі паролі; використання неефективного відновлення облікових даних і забутих паролів; відсутність шифрування або слабо хешовані сховища даних паролів; перекидання облікових даних; відсутність або неефективність багатофакторної автентифікації; повторне використання ідентифікатора сеансу після успішного входу; відсутність анулювання маркерів автентифікації після виходу із системи або після періоду бездіяльності тощо. Гарними практиками запобігання атак через помилки ідентифікації та автентифікації є: вимоги до ротації паролів і їх складності; застосування багатофакторної автентифікації задля запобігання автоматизованого перебору облікових даних, грубого форсування та атак повторного використання викрадених облікових даних; використання захищеного вбудованого менеджера сеансів на боці сервера, який генерує випадковий ідентифікатор сеансу з високою ентропією та анулює його після виходу із системи чи то тривалого простою; обмеження для невдалих спроб входу; реєстрація збоїв та сповіщення адміністраторів у разі виявлення перекидання облікових даних чи то інших атак;

8) *порушення цілісності програмного забезпечення та даних* – відносно нова категорія уразливостей, яка стосується коду або інфраструктури, що долучаються без перевірки їх цілісності. Прикладом цього може бути ситуація, коли програма використовує плагіни, бібліотеки або модулі з ненадійних джерел. Так, нині поширено ПЗ використовує автоматичне оновлення і при цьому оновлення завантажуються без достатньої перевірки цілісності. Тобто потенційно зловмисники можуть завантажити власні оновлення для розпов-

судження функціональності з ненадійної сфери управління та запуску на всіх інсталяціях. Для запобігання таких ризиків варто: використовувати надійні репозиторії бібліотек, перевіряти код та зміни конфігурації для мінімізації ймовірності потрапляння зловмисного коду у конвеєр ПЗ, використовувати інструменти безпеки ланцюга поставок ПЗ для перевірки компонентів на наявність відомих уразливостей;

9) *збої в журналі безпеки та моніторингу* – уразливість, яку важко перевірити, але вона може спричинити злом і доступ до конфіденційних даних клієнтів ПЗ, наприклад: медичних записів, даних паспортів і кредитних карток, платіжних записів клієнтів, і, як наслідок, до моральних і матеріальних збитків. Відсутність моніторингу та реєстрації вебзастосунка позбавляє можливості виявити злом системи і витіки даних. З іншого боку, навіть із журналом моніторингу доволі проблематично виявити атаки на проникнення, адже навіть тестування на проникнення і сканування інструментами динамічного тестування безпеки застосунків не завжди формують відповідні попередження. Так, програма може не виявляти або не сповіщати про активні атаки в режимі реального часу для оперативного реагування, наприклад, коли журнали зберігаються лише локально або відповідні порогові значення сповіщень відсутні чи то не діють. Тому розробники мають переконатися, що всі помилки входу, контролю доступу та перевірки введення на боці сервера реєструються і зберігаються для ідентифікації підозрілих або зловмисних облікових записів. При цьому дані журналу, з одного боку, мають бути закодовані, щоб запобігти ін'єкціям або атакам на системи реєстрації чи моніторингу, а з іншого, журнали доцільно генерувати у форматі, який можна легко використовувати для ефективного моніторингу, контролю цілісності та оперативного формування попереджень про підозрілі дії для швидкого реагування на них;

10) *підробка запитів на боці сервера (Server-Side Request Forgery, SSRF)* не є дуже поширеною уразливістю, проте саме вона дозволяє зловмисникам надсилати URL-запити від імені скомпрометованого сервера в обхід контролю доступу до мережі. Подібного роду атаки можуть стосуватися проникнення через відкриті порти внутрішніх серверів і доступ до конфіденційних даних через сховища метаданих хмарних служб, локальні файли або внутрішні служби. Помилки цієї категорії виникають, коли вебзастосунок отримує віддалений ресурс без перевірки наданої користувачем URL-адреси. Це надає зловмиснику можливість частково або повністю взяти під контроль сервер, щоб змусити його виконувати запити віддалено, навіть якщо він захищений мережевим екра-

ном, VPN чи то іншим типом контролю доступу до мережі. А оскільки сучасні вебзастосунки нині масово надають кінцевим користувачам зручні функції, тому отримання URL-адреси від користувача стає звичною справою. Як наслідок, поширеність уразливості SSRF надалі набиратиме обертів. Крім того, створення ефективного захисту від таких атак ускладнюється через стрімкий розвиток хмарних послуг та ріст складності архітектури хмарних сервісів. Запобігти SSRF можна лише через комплекс засобів захисту в глибинних елементах керування, в який серед інших входить вимкнення перенаправлення HTTP та налаштування у брандмауері правил контролю доступу до мережі, щоб блокувати увесь інтрамережевий трафік, крім основного, та реєструвати всі прийняті і заблоковані мережеві потоки. Також розробники мають: заборонити надсилати необроблені відповіді клієнтам, очищати і перевіряти всі вхідні дані, надані клієнтом, не розгортати служби безпеки на зовнішніх системах і контролювати локальний трафік у цих системах, а для інтерфейсів із виділеними та керованими групами користувачів використовувати мережеве шифрування (наприклад, VPN) у незалежних системах, щоб враховувати високі потреби захисту.

Усі розглянуті види уразливостей вебресурсів безпосередньо пов'язані з відповідними ризиками тестування безпеки вебзастосунків і вебслужб.

2. Аналіз проблем вебтестування безпеки. Тестування безпеки вебпрограм допомагає імітувати та виявляти можливі уразливості та загрози, пов'язані з цією програмою. Воно перевіряє відповідність програми вимогам безпеки під час впливу будь-яких шкідливих вхідних даних.

Можливими проблемами, пов'язаними з аспектом вебтестування безпеки, є: зламані або ненадійні паролі, переповнення буфера, маніпулювання прихованими полями, ненадійне використання криптографії, перехоплення файлів cookie, неправильні конфігурації сервера, слабке керування сесіями, розкриття конфіденційних даних, маніпуляції з параметрами, соціальне хакерство, неадекватна перевірка введених даних тощо [10].

Проблеми, з якими стикається вебтестування безпеки, стосуються розробки автоматизованих інструментів для тестування веббезпеки, використання вебзастосунків RIA (Rich Internet Application), застосування незахищеного криптографічного сховища тощо [11]. Pentester має перевірити стійкість захисту ПЗ від різних невизначених атак, наприклад, від атак на відмову в обслуговуванні (DDoS attack), адже будь-яка уразливість може стати потенційно критичною загрозою для програми. Ризики безпеки вебзастосунку

можуть бути пов'язані з фазою проектування, фазою розробки, фазою розгортання, фазою технічного обслуговування. Саме тестування безпеки використовується для виявлення цих ризиків вебзастосунку, дослідження уразливостей і слабких місць вебпрограми. Наприклад, під час SQL-ін'єкції зловмисник може змінювати SQL-запити і в такий спосіб отримати неавторизований доступ до серверної частини. Ризик, пов'язаний із цією уразливістю, може полягати в тому, що зловмисник зможе отримати доступ до даних, на які він не авторизований.

Розробка автоматизованих інструментів завжди була проблемою тестування вебзастосунків на безпеку. Створити автоматизовані інструменти для тестування безпеки важче, ніж для тестування функціональності вебзастосунку [12]. Традиційні інструменти не встигають за темпами екосистеми програмного забезпечення. Проблеми, з якими стикаються автоматизовані інструменти для тестування веббезпеки, полягають у тому, що вони повинні йти в ногу з технологіями, що стрімко розвиваються та змінюються (наприклад, RIA), і належним чином інтегруватися в наявні робочі процеси розробки.

Зосередження на різних питаннях і проблемах, пов'язаних із тестуванням безпеки вебзастосунків, надає значні дивіденди у виявленні та усуненні різноманітних ризиків, уразливостей, атак, загроз, вірусів тощо. Крім того, корисно навчити тестувальника безпеки вміло моделювати тестову програму та розробляти відповідну стратегію тестування. Важливо розуміти і оцінювати рівень безпеки, який вимагатиме певний проєкт. Активи, які підлягають захисту, слід класифікувати і зазначенням їх рівня, наприклад: конфіденційно, секретно, цілком таємно. Також важливо переконатися, що усі законодавчі вимоги безпеки будуть дотримані у вебзастосунку та його оточенні, базуючись на принципах конфіденційності, доступності та цілісності при зберіганні даних облікових записів, доступі і підключеннях користувачів. Управління ризиками безпеки й відповідність нормативним вимогам належать до політик і процесів, які організації мають забезпечити для дотримання законів, правил та нормативних актів.

Висновки. Проведений аналіз уразливостей безпеки, методів та проблем тестування вебзастосунків виявив наявність різних підходів для захисту програмних продуктів. Доволі не просто зорієнтуватися і зрозуміти, які саме методи використовувати або коли і в якій послідовності застосовувати ті чи інші засоби тестування. Доцільним є баланс у використанні декількох різних методів і підходів, які будуть доповнювати і посилювати один одного.

Комплексний підхід має інтегрувати тестування у всі етапи життєвого циклу розробки ПЗ. Саме такий підхід допомагає використовувати найбільш відповідні й ефективні доступні методи для поточної фази розробки програмного продукту. Ручне й автоматизоване тестування безпеки вебзастосунків мають доповнювати одне одного, оскільки обидва вони є однаково важливими процесами і мають одну мету – захистити програму. Доцільним є поєднання обох методів, починаючи з автоматизованого тестування безпеки та доповнюючи його ручним тестуванням на проникнення. Звісно, бувають виняткові ситуації та обставини, коли доречна лише якась одна техніка. Наприклад, якщо тестувальник не має доступу до вихідного коду, а є потреба тестування на проникнення, адже і таке тестування вочевидь краще, аніж відсутність тестування взагалі. Звичайно таких ситуацій краще уникати і виконувати повноцінно якісне тестування безпеки. А тому існує реальна потреба створювати ефективне тестове середовище для проведення тестування безпеки вебзастосунків.

Збалансований підхід до тестування безпеки залежить від багатьох чинників, у тому числі і зрілості процесу тестування та корпоративної культури, але важливо, щоб компанії приділяли увагу інтеграції тестування безпеки на якомога ранніх етапах життєвого циклу розробки ПЗ. Відповідальність за визначення та реалізацію ефективних заходів безпеки для свого процесу нині перейшла до самих розробників. Тестування безпеки має поєднувати різні ефективні техніки і методології для оцінки безпеки програми та її оточення. Адже жодна технологія не захищена від хакерів чи кіберзлочинців, а потреба у захисті різних типів вебзастосунків нині, як ніколи, актуальна.

ЛІТЕРАТУРА

1. Web Security Testing Guide. [Online]. Available: <https://owasp.org/www-project-web-security-testing-guide/stable/2-Introduction/>
2. Aydos M. Security testing of web applications: A systematic mapping of the literature / Aydos M., Aldan Ç., Coşkun E., Soydan A. // Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences. – 2022. – Vol. 34, Issue 9. – P. 6775-6792. DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.09.018.
3. Mubshra Q. A Rigorous Approach to Prioritizing Challenges of Web-Based Application Systems / Mubshra Q., Shahid F., Mohd H., Nizam B., Md N., Atif A. // Malaysian Journal of Computer Science. – 2021. – № 34. DOI: 10.22452/mjcs.vol34no2.1.
4. Arunima J. Security Testing of Web Applications: Issues and Challenges / Arunima J., Gaurav R., Dheerendra S. // International Journal of Computer Applications. – 2014. – № 88. DOI: 10.5120/15334-3667.

5. Omer T. Analysis of Security Testing Techniques. / Omer T., Sadeeq J., Alaa K., Adil K., Fazal K., Sana K. // Intelligent Automation and Soft Computing. – 2021. – № 29. – P. 291-306. DOI: 10.32604/iasc.2021.017260.
6. Riandhanu I. Analisis Metode Open Web Application Security Project (OWASP) Menggunakan Penetration Testing pada Keamanan Website Absensi. / Riandhanu I. // Jurnal Informasi dan Teknologi. – 2022. – Vol. 4, No. 3. – DOI: 10.37034/jidt.v4i3.236.
7. OWASP Top Ten [Online]. Available: <https://owasp.org/www-project-top-ten>
8. Broken Access Control – A01:2021 [Online]. Available: https://owasp.org/Top10/A01_2021-Broken_Access_Control/
9. Cryptographic Failures – A02:2021 [Online]. Available: https://owasp.org/Top10/A02_2021-Cryptographic_Failures/#list-of-mapped-cwes
10. Web Security Testing Guide. [Online]. Available: <https://owasp.org/www-project-web-security-testing-guide/stable/2-Introduction/>
11. Keshav M. Automated VS Manual Security Testing – Which One to Choose? [Online]. Available: <https://www.getastra.com/blog/security-audit/manual-security-testing/>
12. Трофименко О.Г. Автоматизація тестування вебсайтів електронної комерції. / Трофименко О.Г., Пастернак Ю.Ю., Манаков С.Ю., Лобода Ю.Г. // Сучасна спеціальна техніка. – 2021. – № 2(65). – С. 46-59. DOI: 10.36486/mst2411-3816.2021.2(65).5.

REFERENCES

1. Web Security Testing Guide. [Online]. Available: <https://owasp.org/www-project-web-security-testing-guide/stable/2-Introduction/>
2. Aydos M. Security testing of web applications: A systematic mapping of the literature / Aydos M., Aldan Ç., Coşkun E., Soydan A. // Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences. – 2022. – Vol. 34, Issue 9. – P. 6775-6792. DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.09.018.
3. Mubshra Q. A Rigorous Approach to Prioritizing Challenges of Web-Based Application Systems / Mubshra Q., Shahid F., Mohd H., Nizam B., Md N., Atif A. // Malaysian Journal of Computer Science. – 2021. – № 34. DOI: 10.22452/mjcs.vol34no2.1.
4. Arunima J. Security Testing of Web Applications: Issues and Challenges / Arunima J., Gaurav R., Dheerendra S. // International Journal of Computer Applications. – 2014. – № 88. DOI: 10.5120/15334-3667.
5. Omer T. Analysis of Security Testing Techniques. / Omer T., Sadeeq J., Alaa K., Adil K., Fazal K., Sana K. // Intelligent Automation and Soft Computing. – 2021. – №

29. – P. 291-306. DOI: 10.32604/iasc.2021.017260.

6. Riandhanu I. Analisis Metode Open Web Application Security Project (OWASP) Menggunakan Penetration Testing pada Keamanan Website Absensi. / Riandhanu I. // Jurnal Informasi dan Teknologi. – 2022. – Vol. 4, No. 3. – DOI: 10.37034/jidt.v4i3.236.

7. OWASP Top Ten [Online]. Available: <https://owasp.org/www-project-top-ten>

8. Broken Access Control – A01:2021 [Online]. Available: https://owasp.org/Top10/A01_2021-Broken_Access_Control/

9. Cryptographic Failures – A02:2021 [Online]. Available: https://owasp.org/Top10/A02_2021-Cryptographic_Failures/#list-of-mapped-cwes

10. Web Security Testing Guide. [Online]. Available: <https://owasp.org/www-project-web-security-testing-guide/stable/2-Introduction/>

11. Keshav M. Automated VS Manual Security Testing – Which One to Choose? [Online]. Available: <https://www.getastra.com/blog/security-audit/manual-security-testing/>

12. Trofymenko O. Automation of testing e-commerce websites / Trofymenko O., Pasternak Yu., Manakov S., Loboda Yu. // Modern Special Technics. – 2021. – № 2(65). – C. 46-59. DOI: 10.36486/mst2411–3816.2021.2(65).5.

Received 31.03.2023.

Accepted 03.04.2023.

Analysis of vulnerabilities and security problems of web applications

The article provides a comprehensive analysis of vulnerabilities, methods, tools and problems faced by web application security testing. The analysis of scientific research in the field of web application security testing revealed a significant interest of scientists in finding effective ways to minimize site security risks and vulnerabilities. It was found out that the list of the most common web application vulnerabilities includes: broken access control, cryptographic failures, misconfiguration of security, SQL and other injections, insecure design, identification and authentication errors, etc. Specific features of the security vulnerabilities of web applications are highlighted. The problems faced by automated tools for web security testing are separately considered, namely the development of automated tools for web security testing, the use of RIA (Rich Internet Application) web applications, and the use of insecure cryptographic storage. Web application security risks can be associated with the design phase, the development phase, the deployment phase, and the maintenance phase. It is security testing that is used to identify these risks of the web application, to investigate the vulnerabilities and weak points of the web application. The conducted analysis of security vulnerabilities,

methods and problems of testing web applications revealed the presence of different approaches to protect software products. A combination of manual and automated web application security testing techniques is advisable, starting with automated security testing and complementing it with manual penetration testing. A comprehensive approach should integrate testing into all stages of the software development life cycle. Such approach helps to use the most appropriate and effective available methods for the current phase of software product development.

Keywords: security testing, web application, web application security, security vulnerabilities, testing tools.

Трофименко Олена Григорівна - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій Національного університету «Одеська юридична академія».

Дика Анастасія Іванівна - асистент кафедри інформаційних технологій Національного університету «Одеська юридична академія».

Лобода Юлія Геннадіївна - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій Національного університету «Одеська юридична академія».

Trofymenko Olena - PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information Technologies of the National University "Odessa Law Academy".

Dyka Anastasiia - Assistant of Department of Information Technologies of the National University "Odessa Academy of Law"

Loboda Yuliia - PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information Technologies of the National University "Odessa Law Academy".

V.V. Strelbitskyi, L.V. Bovnegra, A.V. Pavlyshko

ANALYSIS OF STRENGTH OF A FORK OF THE FORKLIFT BY NUMERICAL METHODS

Abstract. Forklift is an industrial power truck, commonly called forklifts or lift trucks, then usually have two forks the can be trial power truck used forklifting and transport materials. Forklifts, to this day, the fork strength of a forklift under load still seems to be one of the biggest issues. Fork's related structural design and detail have a significant impact on the overall performance and reliability of a forklift. In this work, static analyses of a fork forklift were performed using Finite Element Method, on the free software FreeCAD, a multidisciplinary software application that is the result of a long-term active collaboration between developers and users. Open science hardware is cheaper, easier to maintain, and more accessible to more people. In this paper, by calculating the maximum normal stress of the section, the force situation and allowable stress of the fork are analyzed. The fork is made of structural material is 40Cr steel. The output values of the static study consist in establishing the distribution of equivalent unitary stresses (stress state) according to the von Mises criterion. The maximum stress of the structure is 128 MPa, which is does not exceed the allowable. Then in order to enhance the structural strength of the weak part, the measures of gradually increasing the fillet radius of the fork root were proposed, and the radius were selected as 35mm and 45mm, the weight of the forklift load was still 0,5t. Numerical experiments have shown that by increasing the radius from 25 to 45 mm, stresses decrease by 1.1...1.15 times, which is consistent with the theory of basic mechanics that stress concentration can easily lead to fatigue failure of the structure. Both numerical calculations and visual analysis showed consistency, with stress concentrations observed at the fork neck, demonstrating the accuracy of the established finite element model.

Keywords: forklift, forks, stresses, finite element analysis, FreeCAD.

Introduction. Because of the varieties, different shapes, different packaging of the goods, loading and unloading has always been a heavy process during transportation. Loading operations directly influences the high level of probability that delivery will be delivered on time, resulting in an impact to customers' service. Due to moment's profitable problems, the demand for universal lifting and transporting vehicles with high effectiveness is high. Thanks to this device, the storage capacity has increased significantly. Forklifts can be used in many places, such as warehouses,

factories, farms, seaports, construction sites, supermarkets, etc. Forklift usage can vary from a few hours a day to 24 hours a day, 7 days a week, used indoors and outdoor purposes. In practice, opinions regarding forklifts engagement are left to the storehouse experts. The existing forklift design has rotation restrictions, and the structure has potential safety hazards. The gasoline or propane forklifts are much stronger or faster as compared to electric forklifts, but considered to be difficult to maintain, and it is also fuel efficient. The most important part of a forklift is the fork which irresponsible for carrying the load is forklift fork. It should be noted that while the certification process for each wheel hoist model, the transport and lifting performance of the equipment is tested and specified, and the limits of operating capabilities and conditions of use are measured. The fork is the most popular removable equipment item of the fork lift trucks. Forklifts usually have two forks on the can be moved forward and backward, and they are the reason the machine is called a forklift and are therefore critical to safe operation [1,2].

Literature Review. The strength of loader attachment is an important indicator of reliability and is the focus of forklift research [1-5]. In order to estimate the influence of the applied loads on the material, it becomes necessary to assess the strength of the forks. The fork strength of the forklift under loading still seems to be one of the biggest concerns till date. The traditional methods of stress analysis and fatigue research are mainly carried out through static calculation and prototype trial-manufacture, and modified according to the experimental results [3-5]. However, it takes a lot of cost to repeat the above work.

The development of finite element numerical simulation technology the method of calculating structural strength based on computer aided design (CAD) and finite element method (FEM) has been widely d in engineering field [6-11]. Thus, researchers paper [9] analyzed static stresses in the telescopic masts of forklift, using FEM, and the error of analysis and test was less than 10%. In paper [12] using the FEA method, it was found that, it was found that the maximum stress gradient direction was in agreement with the crack initiating direction. Usually the crack the vertical to the larger of two top stresses. In work [13], a static analysis of a simplified fork design was carried out, the results of which served for the structural design of a forklift fork. Cyclic loading occurs under normal operating conditions on various machine components leading to the role of fatigue failure mechanisms [14-15].

The stresses in the forks depend on the conditions of their fastening, loading and design features, therefore, the **fundamental goal of this work is** analysis of strength of a fork of the forklift by numerical methods.

Research methodology and results. There was a fork breakdown on one of the forklifts, all the others were examined. A detailed study of the operating conditions and structural integrity of all in-service forks made it possible to detect cracks in the forks. Analysis of the work [2] showed the stress concentrations typically serve as fatigue crack initiation sites.

FEA does not require physical prototyping and can be used to analyze any part/component of the overall system under specific operating conditions. The designing dimensioning and modelling of the fork was executed on the free software FreeCAD, a multidisciplinary software application that is the result of a long-term active collaboration between developers and users [7]. Open source scientific hardware promotes open science by facilitating the comparison of scientific experiments.

The model was developed in step [16]:

1. Modeling the geometry: creating the geometry with FreeCAD.
2. Creating an analysis. Adding simulation constraints such as loads and fixed supports to the geometric model.
3. Adding materials to the parts of the geometric model.
4. Creating a finite element mesh for the geometrical model.
5. Solving: running an external solver from within FreeCAD and postprocessing: visualizing the analysis results from within FreeCAD.

Accurate and reliable computational model is the basis of finite element analysis.

In this paper, the 0,5 t loader is used as the object.

The fork studied in this paper is a widely d hanger type. In fig.1 shows the solid 3d model (a) and dimensions (b) of forklift fork.

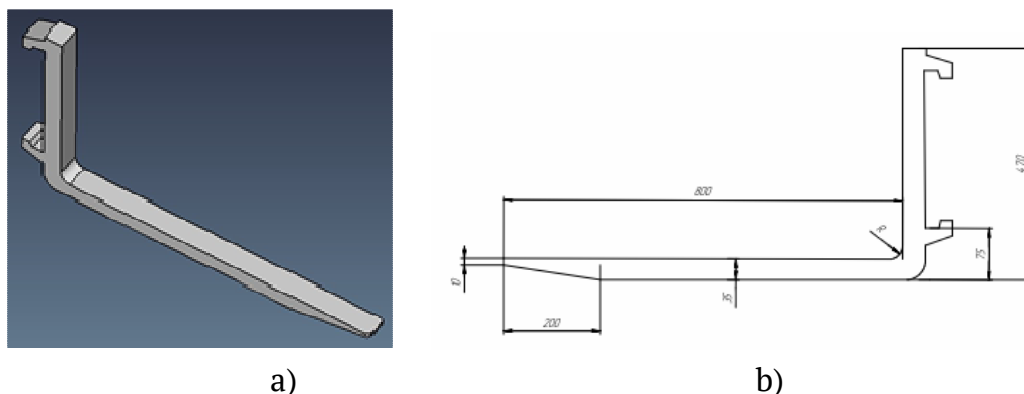


Figure 1 - 3d model (a) and dimensions (b) of forklift fork

The forks are made of steel structural material is 40Cr steel. Fillet radius of the fork root $R=25$ mm. According to the actual use of the fork, the constraints and force

loads of the finite element analysis are determined (fig.2) and triangular element mesh wads, as shown in fig.3. Most literatures [9,12,14] regard the load as a concentrated load (fig.2).

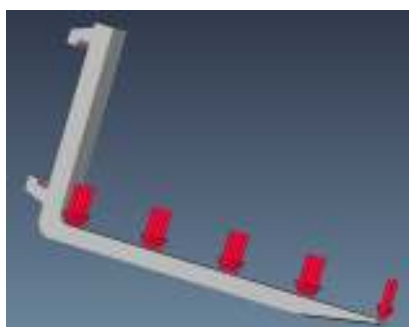


Figure 2 - Fork support's restricted degrees of freedom

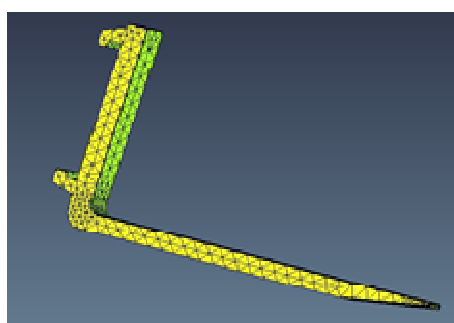


Figure 3 - Mesh model

The output values of the static study consist in establishing the distribution of equivalent unitary stresses (stress state) according to the von Mises criterion. The fig. 4 shows that under concentrated load, the fork has stress concentration problem in the fillet area of the fork root, then are in accordance with the theoretical force analysis, which verifies the accuracy of the model to a certain extent. However, the maximum stress of the structure is 128 MPa, that is greater than the allowed stress 121 MPa.

From Fig. 3 it can be seen that the stress concentration is mainly in the fillet area of the fork root. Therefore, in order to enhance the structural strength of the weak part, the measures of gradually increasing the fillet radius of the fork root were proposed, and the radius were selected as 35mm and 45mm, the weight of the fork-lift load was still 0,5t. The calculation results are shown in fig.5, the relationship between the maximum structural stress and the fillet radius which is shown in fig. 6.

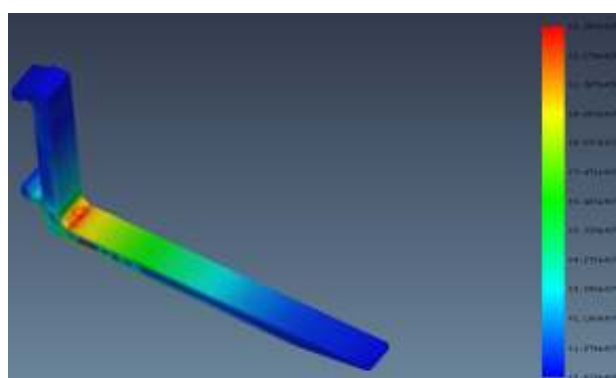


Figure 4 - Result of finite element analysis for R=25 mm

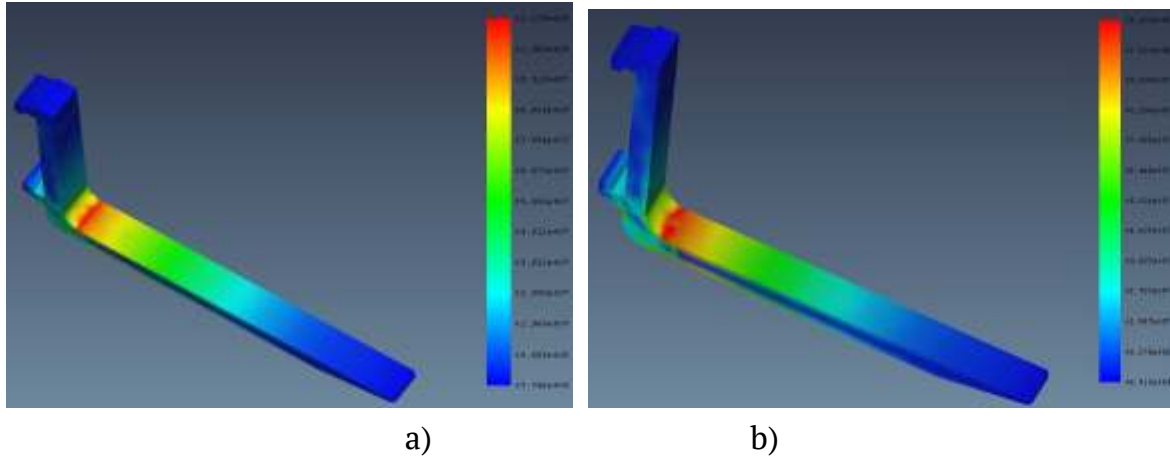


Figure 5 - Result of finite element analysis for R=35mm (a) and R=45 mm (b)

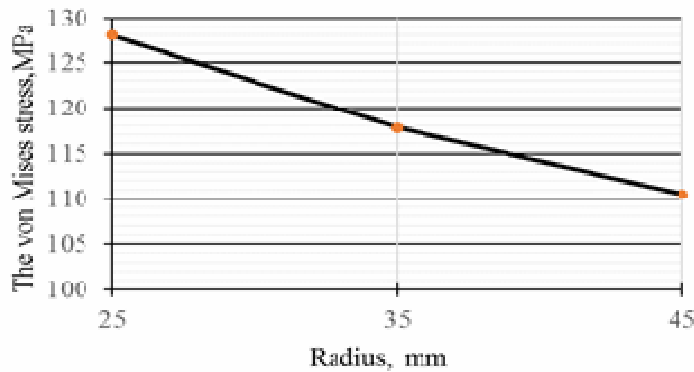


Figure 6 - Dependence of maximum structural stress and fillet radius

From Fig.8 it can be seen that as the radius increases, the stresses decrease, which is consistent with the basic mechanics theory that stress concentration can easily lead to structural fatigue failure, the dependence is nonlinear. In our case, the stress drops in 1,1...1,15 times

The maximum stresses at the fork section can be explained are the result of the contribution of the bending moment and the load being lifted. The analysis of the presented results shows of the fork root, which is a dangerous working condition and the fork is prone to excessive and may ca surface damage or even breakage in the fillet of the fork root, which is a dangerous working condition. the fork is prone to excessive and may ca surface damage or even breakage in the fillet area of the fork root, which is a dangerous working condition. Consequently, it is more appropriate to change the fillet radius to 45mm to meet the strength requirement that the maximum stress is less than the allowable stress.

The remaining areas are relatively stress free.

Conclusions. When the fork is subjected to continuous load, it may cause the crack development and surface to be damaged. The fork's structural design plays a key role in the efficiency and reliability of the forklift. According to the actual use of the fork, the constraint conditions and force loads for finite element analysis were determined, calculations were made performed using Finite Element Method in the FreeCAD. After adding geometric model, meshing, setting material parameters, constraints and loads, the finite element calculation model of the original fork was established. Numerical experiments have shown that an increase in radius leads to a decrease, which is consistent with the theory of basic mechanics. As experiments [1] show, the orientation of fatigue zone advocates that crack initiation occurred at the outer fork side, which constitutes the designed compression zone confirms the accuracy of the accuracy of the established finite element model. Calculation results show the radius from 25 to 45 mm, stresses decrease by 1.1...1.15 times. This study will be useful for scientific experts in the forklifts.

REFERENCES

1. Pantazopoulos G. Analysis of abnormal fatigue failure of forklift forks / G. Pantazopoulos, A., Vazdirvanidis, A. Rikos, A. Toulfatzis // Case Studies in Engineering Failure Analysis. – 2014. – Т. 2. – №. 1. – pp. 9-14.
2. Massone J. M., Boeri R. E. Failure of forklift forks / J. M. Massone, R.E. Boeri // Engineering failure analysis. – 2010. – Т. 17. – №. 5. – pp. 1062-1068.
3. Jigh B.H.G. Low cycle fatigue analyses of open-celled aluminum foam under compression-compression loading using experimental and microstructure finite element analysis / B.H.G. Jigh, H. Hosseini-Toudeshky, M.A. Farsi //Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Т. 797. – pp. 231-236.
4. Zhen C. Numerical and Experimental Study on Trimaran Cross-Deck Structure's Fatigue Characteristics Based on the Spectral Fatigue Method / C. Zhen, G. Feng, T. Wang, P. Yu //Journal of Marine Science and Engineering. – 2019. – Т. 7. – №. 3. – p. 62.
5. Deshmukh P. Impact of shifting load centers on the stability of the forklift / P. Deshmukh, G.K. Wadhwa //International Journal of Computer Engineering in Research Trends. – 2018. – Т. 5. – №. 4. – pp. 92-97.
6. Zhou Y. Theoretical and numerical investigation of stress mode shapes in multi-axial random fatigue / Y. Zhou, J. Tao // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – Т. 127. – pp. 499-512.
7. Strelbitskyi V., Bovnegra L., Punchenko N. Application of free software FreeCAD for modelling and analysis of generated stresses of Jib crane beam. INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES IST-2021. Proceedings of the 10-th International Scientific and Technical Conference, Kharkiv - Odesa, Ukraine, September 13-19, 2021, pp.131-135.

- 8 Florescu V. Sescu-Gal Research on the Parameters Influencing the Numerical Analysis of the Fatigue Behaviour of a Forklift-ARM / V. Florescu, S. Mocanu, A. Neagu C. //Romanian Journal of Transport Infrastructure. – 2021. – Т. 10. – №. 1. – pp. 1-10.
9. Sequeira A.A. Design and Fabrication of Battery Operated Forklift/ A.A. Sequeira, S. Mohammed, A.A. Kumar, M. Sameer, Y.A. Kareem, K.H. Sachidananda //Journal Européen des Systèmes Automatisés. – 2019. – Т. 52. – №. 6. – pp. 569-574.
10. Zhang E. Structural optimization of forklift fork based on numerical simulation and mathematical modeling of stress and fatigue / E. Zhang, J. Zhuo, Z. Liu, T. Guo //Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. – 2020. – Т. 36. – №. 1. – pp.1-12.
11. Akin J. E. Finite element analysis concepts: via SolidWorks. – World Scientific, 2010. - 313 p.
12. Xu X. Fatigue failure of an intermediate transition block in fuel-injection pump fork assembly of a truck diesel engine / X. Xu, Z. Yu, B. Yu //Engineering Failure Analysis. – 2018. – Т. 94. – pp. 13-23.
13. Gu X, Wang W., Lin N., Zhang G., Gu X. The Finite Element Analysis for Fork Based on ANSYS //2015 International Conference on Electrical, Electronics and Mechatronics. – Atlantis Press, 2015. – pp. 152-154.
- 14 Pantazopoulos G. Fatigue failure of steel links operating as chain components in a heavy duty draw bench / G. Pantazopoulos, A. Vazdirvanidis, A. Toulfatzis, A. Rikos //Engineering Failure Analysis. – 2009. – Т. 16. – №. 7. – pp. 2440-2449.
15. Strelbitskyi V. Eksperymentalne doslidzhennia vplyvu napratsiuвання ta asymetrii tsykladu na trishchynostiikist stalei portalnykh kraniv / V.V. Strelbitskyi, O.O. Nemchuk // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2020. – № 1. – pp. 245–248. (In Ukraine)
16. Manual: What is FreeCAD [Internet resource]. – Режим доступу: https://wiki.freecad.org/FEM_Workbench.
17. Wang Y. Y. Tensile strain limits of girth welds with surface-breaking defects Part II experimental correlation and validation / Y.Y. Wang, D. Horsley, W. Cheng, A. Glover, M. McLamb, J.Zhou, R. Denys //Pipeline Technology, Proceedings of the 4th International Conference on Pipeline Technology. – 2004. – pp. 9-13.

Received 29.03.2023.

Accepted 03.04.2023.

Аналіз міцності вил вилочного навантажувача чисельними методами

Навантажувачі - це промислові силові машини, які називають навантажувачами або вилочними навантажувачами, котрі мають дві вилки. Їх широко використовують на складах, будівельних майданчиках, у морських портах, супермаркетах та ін.. Їх можуть експлуатувати від декількох годин на день до 24 годин на

добу, 7 днів на тиждень, як в приміщенні, так і на відкритому повітрі. На продуктивність та надійність навантажувача впливають конструкція та деталі, пов'язані з вилкою, яка відповідає за надійне транспортування вантажу. На сьогодні при дослідженні напруженого стану конструкцій в галузі машинобудування широко використовують чисельні методи розрахунку, а саме моделювання методом скінчених елементів (МСЕ). Аналіз робіт з визначення статичних напружень у конструкціях вилочних навантажувачів з використанням МСЕ показав, що похибка між результатами аналізу і випробувань не перевищила 10%. Напруження у вилах залежать від умов їх кріплення, навантаження і конструкції. У статті виконано аналіз напруженого стану вил вилочного навантажувача за допомогою методу кінцевих елементів у безкоштовному програмному забезпеченні FreeCAD, який є результатом довгострокової активної співпраці між розробниками та користувачами. Безкоштовне програмне забезпечення простіше в обслуговуванні та доступне для більшої кількості людей. Вилка виготовлена з конструкційного матеріалу - сталі 40Х. Було встановлено, що напруження у в області округлення кореня вилки є максимальні та складають 128 МПа. Для зменшення напружень було запропоновано збільшити радіус з 25 мм до 35 мм та 45 мм. Проведені чисельні експерименти показали, що при збільшенні радіуса з 25 до 45 мм призводить до зменшення напружень у 1,1...1,15 рази, що узгоджується з теорією базової механіки про те, що концентрація напружень може легко призвести до втомного руйнування конструкції.

Стрельбіцький Віктор Васильович – доцент, кандидат технічних наук, кафедра Підйомно-транспортні машини та інжиніринг портового технологічного обладнання, Одеський національний морський університет.

Бовнегра Любов Віталіївна - доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри інформаційних технологій проєктування та дизайну, Національний університет «Одеська політехніка».

Павлишко Андрій Володимирович - доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій проєктування та дизайну, Національний університет «Одеська політехніка».

Strelbitskyi Viktor Vasylovych – PhD, associated professor, Hoisting and transport machines and engineering of port technological equipment, Odessa National Maritime University.

Bovnegra Liubov Vitaliivna - PhD, associated professor, Head of Department of Design Information Technologies and Design, Odessa Polytechnic National University.

Pavlyshko Andrii Volodymirovich - PhD, associated professor, Odessa Polytechnic National University.

Т.В. Балаханова, Г.А. Кононенко,

О.А. Сафронова, О.Л. Сафронов, О.П. Клинова

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАЦІЇ МІКРОСТРУКТУРИ ОСЬОВИХ ЗАГОТОВОК ПІСЛЯ ПРОКАТУВАННЯ

Анотація. Проведено дослідження особливостей структури осьових заготовок зі сталі марки F (AAR M-101-2017 Axles, carbon steel, heat-treated після повздовжнього прокатування на трубопрокатному агрегаті ТПА 5 – 12" з нілігримовими станами за трьома режимами обтиснень (1 режим: Ш 470 → Ш 380 → Ш 260 мм; 2 режим: Ш 470 → Ш 420 → Ш 260 мм; 3 режим: Ш 470 → Ш 260 мм). Визначення особливостей розподілу деформаційного пророблення та формування кінцевої структури після деформування за дослідними режимами БЛЗ Ш470 мм на круг Ш260 мм є метою досліджень. Зразки для дослідження структури відбирали як від вихідної БЛЗ, так і готової чорнової осі по всьому перерізу. Визначено, що рівномірність зеренної структури найвища після застосування режиму №3 (Ш 470 → Ш 260 мм).

Ключові слова: безперервнолита заготовка, вуглецева сталь, сталь марки F, гаряча деформація, ліквация, залізнична ось, чорнова ось, прокатка.

Вступ. Задача підвищення якості металопродукції великих перерізів, виробленої з безперервнолитої заготовки (БЛЗ), пов'язана з низкою труднощів. До них відноситься наявність внутрішніх дефектів макроструктури заготовки (осьова пухкість, пористість, ліквация, кристалізаційні тріщини тощо). У поверхневих ділянках при кристалізації формується найменший рівень ліквации [1-3]. При цьому, як правило, по перерізу крупногабаритної металопродукції необхідно отримати однорідну структуру по величині зерна.

Створення і освоєння нових технологій і конструкцій станів, оптимізація процесів деформації вимагають знань про зміну структури при переділі БЛЗ на станах гарячої деформації. При пластичній деформації необхідно досягти течії металу для досягнення геометрії виробу, створити раціональну волокнисту будову і виключити вихід центральної зони БЛЗ в район найбільш навантажених зон і до поверхні деталі.

Завдяки деформації окрім досягнення заданої геометрії виробу, можна досягнути ущільнення структури, що сприяє «заварюванню» дефектів та позитивно впливає на зеренну структуру, в тому числі і на подрібнення дендритів, що формуються при кристалізації сталі. На характер деформації осьової зони металу впливають багато параметрів процесу прокатки, питання про проникнення деформації стиснення в осьову зону при прокатуванні представляє не тільки теоретичний, але і практичний інтерес. З іншого боку технологія прокатки повинна бути досить ефективною і з точки зору опрацювання поверхневих шарів металу і викатки в ньому поверхневих дефектів. Найбільші проблеми пророблення вихідної литої структури виникають у центральній частині осьової заготовки, яка є найбільш «проблемною» частиною безперервного злитка. Оскільки рівень ліквації тут найбільший, такий дефект як центральна пористість може бути відсутнім, але щільність металу цієї зони поступається металу з поверхневих частин цієї ж самої заготовки. Центр вихідної заготовки також найбільш забруднений неметалевими включеннями, що пояснюється як більшим рівнем ліквації, так і відтисненням ендогенних включень потоком рідкого металу під час кристалізації.

Постановка мети і завдань дослідження. Метою досліджень є визначення особливостей розподілу деформаційного пророблення та формування кінцевої структури після деформування за дослідними режимами БЛЗ Ø470 мм на круг Ø260 мм.

Матеріал і методика досліджень. Досліджено особливості трансформації мікроструктури осьових заготовок Ø 260 мм зі сталі марки F близького хімічного складу після поздовжнього прокатування на пілігримових станах ТПА 5 – 12" за трьома режимами обтиснень (2 режими за 2 проходи та 1 режим за 1 прохід). Маршрут прокатування наведено в таблиці 1. Зразки для дослідження структури відбирали як від вихідної БЛЗ, так і готової чорнової осі по всьому перерізу.

На рисунку 1 показано розподіл розмірів первинної дендритної структури (загальний розмір суміжної лікваційної смуги і смуги без ліквації) за перерізом чорнової осі. Якщо порівнювати середні розміри слідів дендритної структури після деформації за дослідними режимами, ми бачимо, що найменш раціональним виявляється режим № 1.

Опис режимів поздовжнього прокатування на пильгерстані ТПА 5 – 12”
в умовах ТПЦ №4 ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ»

Режим деформації, № з/п	Маршрут гарячої деформації
1	Маршрут: Ø 470 → Ø 380 → Ø 260 мм
2	Маршрут: Ø 470 → Ø 420 → Ø 260 мм
3	Маршрут: Ø 470 → Ø 260 мм

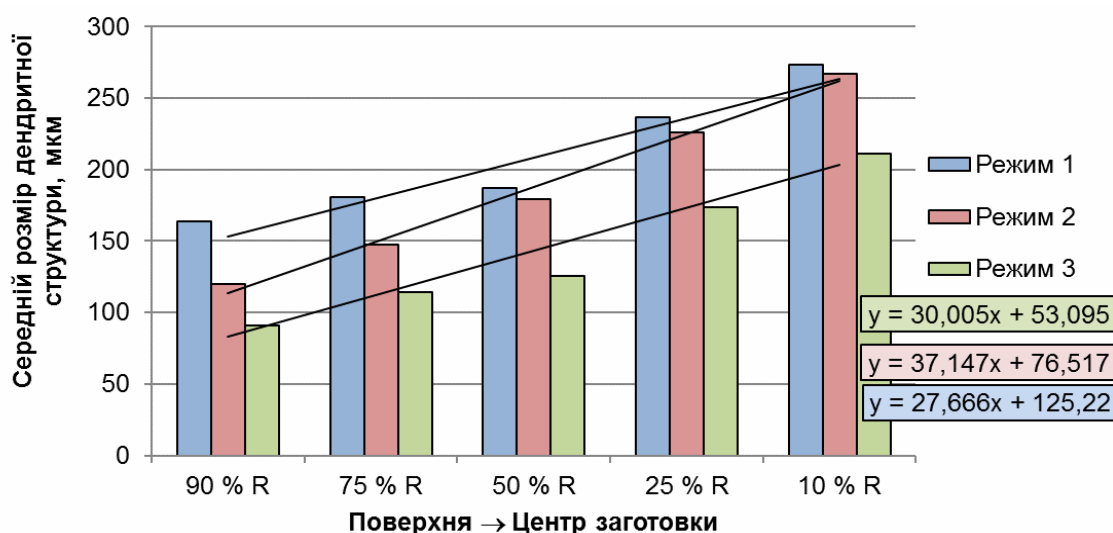


Рисунок 1 – Розподіл розмірів ліквацийних ділянок за перерізом чорнових осей

При режимі № 2 попри уявну загальну однорідність структури, ліквацийні ділянки є досить великими, що забезпечує неоднорідність структури у мікромасштабі.

Найбільша нерівномірність ліквацийного фону, яка спостерігається у осьовій заготовці, виготовленій із застосуванням режиму № 1, проявляється і під час дослідження мікроструктури залізничних осей, отриманих за вказаними режимами. В цілому середній розмір дійсного зерна вуглецевої сталі марки F зразків всіх досліджених заготовок після двох нормалізацій і відпуску не перевищує 28,0 мкм, що становить не більше 7,0 номера за ASTM E 112 – 13. Однак рівномірність зеренної структури вища із застосуванням режиму №2 (рис. 2), ніж при випробуванні режимів 1 і 3.

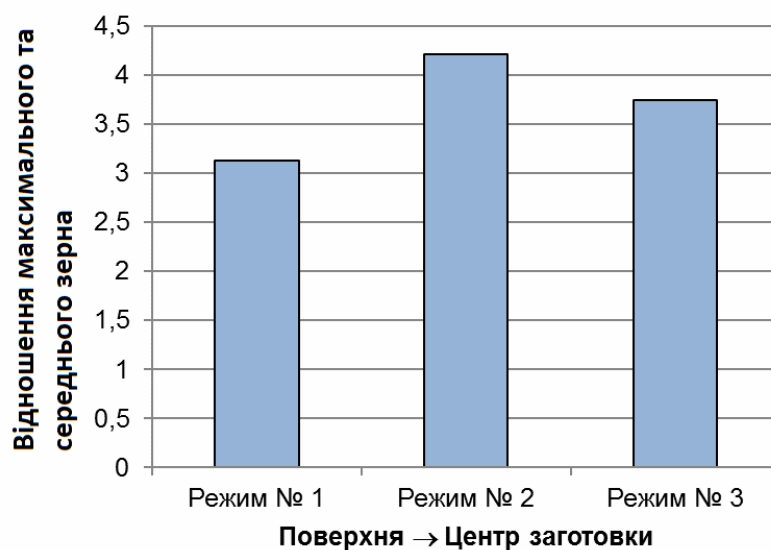


Рисунок 2 – Рівномірність зеренної структури залізничних осей, виготовлених за різними режимами

Така неоднорідність структури може негативно вплинути на експлуатаційні властивості залізничних осей, зокрема на показники втомної міцності [4-6].

Висновок. Розглянуто вплив технології виробництва на особливості структури всього перерізу чорнових осей з вуглецевої сталі марки F (початкова лита заготовка $\varnothing 470\text{мм}$), виготовлених відповідно до вимог стандарту AAR M – 101. Встановлено, що режим №2 ($\varnothing 470 \rightarrow \varnothing 420 \rightarrow \varnothing 260\text{ мм}$) забезпечує найбільшу рівномірність зеренної структури осей, а при застосуванні режиму №3 ($\varnothing 470 \rightarrow \varnothing 260\text{ мм}$) спостерігається більша рівномірність за ліквіційними ділянками за перерізом чорнових осей.

ЛІТЕРАТУРА

1. Klenam D.E.P., Chown L.H., Papo M.J., Cornish L.A. Characterization of railway stock axle produced from medium-carbon steel. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Advanced Metals Initiative Nuclear Materials Development Network Conference. 2015. P.125-138.
2. Babachenko O.I., D'Omina K.H., Kononenko H.A., Dement'Yeva Zh. A., Podol'S'Kyy R.V., Safronova O.A. Influence of Cooling Rate at Hardening of Continuous Casting Blank on Parameters of Dendritic Structure of Carbon Steel with 0.54% C. Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. 2021. 43,№11. P. 1537-1551. DOI: 10.15407/mfint.43.11.1537

3. Babachenko O.I., Kononenko H.A., Podolskyi R.V., Safronova O.A., Taranenko A.O. Structure and Fracture Resistance of Steels in Different Zones of Railway Axles. *Materials Science*. 2022. №58. P.417–421 (2022). DOI: 10.1007/s11003-023-00679-1
4. Hutny A.M. M. Warzecha, W. Derda, P. Wiczorek Segregation of elements in billets made of carbon steels for long products. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018. 63,№4. P. 2075-2079. DOI: 10.24425/amm.2018.125145
5. Babachenko O. I., Kononenko H. A., Podolskyi R. V., Safronova O. A. Steel for Railroad Rails with Improved Operating Properties. *Materials Science*. 2021. №56. P. 814-819. DOI:10.1007/s11003-021-00499-1
6. Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Подольський Р.В., Сафронова О.А. Розроблення хімічного складу сталі та режиму термічної обробки залізничних коліс для експлуатації в легких умовах гальмування за високих навантажень на вісь. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2022. №1 (96). P. 9-16. DOI: 10.30838/J.PMHTM.2413.240422.9.837

REFERENCE

1. Klenam D.E.P., Chown L.H., Papo M.J., Cornish L.A. Characterization of railway stock axle produced from medium-carbon steel. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy Advanced Metals Initiative Nuclear Materials Development Network Conference. 2015. P.125-138.
2. Babachenko O.I., D’Omina K.H., Kononenko H.A., Dement’Yeva Zh. A., Podol’s’Kyy R.V., Safronova O.A. Influence of Cooling Rate at Hardening of Continuous Casting Blank on Parameters of Dendritic Structure of Carbon Steel with 0.54% C. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2021. 43,№11. P. 1537-1551. DOI: 10.15407/mfint.43.11.1537
3. Babachenko O.I., Kononenko H.A., Podolskyi R.V., Safronova O.A., Taranenko A.O. Structure and Fracture Resistance of Steels in Different Zones of Railway Axles. *Materials Science*. 2022. №58. P.417–421 (2022). DOI: 10.1007/s11003-023-00679-1
4. Hutny A.M. M. Warzecha, W. Derda, P. Wiczorek Segregation of elements in billets made of carbon steels for long products. *Arch. Metall. Mater.* 2018. 63,№4. P. 2075-2079. DOI: 10.24425/amm.2018.125145
5. Babachenko O.I., Kononenko H.A., Podolskyi R.V., Safronova O.A. Steel for Railroad Rails with Improved Operating Properties. *Materials Science*. 2021. №56. P. 814-819. DOI:10.1007/s11003-021-00499-1
6. Babachenko O.I., Kononenko H.A., Podolskyi R.V., Safronova O.A. Rozroblennia khimichnoho skladu stali ta rezhymu termichnoi obrobky zaliznychnykh kolis dlia ekspluatatsii v lehkykh umovakh halmuvannia za vysokykh navantazhen na vis.

Analysis of the transformation of the microstructure of axial billets after rolling

The task of improving the quality of metal products of large cross-sections produced from continuous cast billets (CBS) is associated with a number of difficulties. These include the presence of internal defects in the macrostructure of the workpiece (axial looseness, porosity, liquation, crystallization cracks, etc.). Processing from the point of view of deformation of cast workpieces is necessary first of all to eliminate cast defects. An increase in working out contributes not only to the welding of existing microdiscontinuities and, in this connection, to an increase in the density of the metal, but also to the extraction, crushing and reduction of the cross-section of the existing non-metallic inclusions. However, the dimensions of the elements of the primary structure, which are presented on the graphs, are also of the greatest importance. The smallest level of liquation is formed in the surface areas during crystallization. At the same time, as a rule, it is necessary to obtain a homogeneous structure in terms of grain size on the cross-section of large-sized metal products. A study of the features of the structure of axle blanks made of steel grade F (AAR M-101-2017 Axles, carbon steel, heat-treated) after longitudinal rolling on a TPA 5-12" pipe rolling unit with pilgrim mills in three crimping modes (1 mode: $\text{Ø } 470 \rightarrow \text{Ø } 380 \rightarrow \text{Ø } 260 \text{ mm}$; 2nd mode: $\text{Ø } 470 \rightarrow \text{Ø } 420 \rightarrow \text{Ø } 260 \text{ mm}$; 3rd mode: $\text{Ø } 470 \rightarrow \text{Ø } 260 \text{ mm}$). Determination of the features of the distribution of deformation work and the formation of the final structure after deformation according to the experimental modes of BLZ $\text{Ø } 470 \text{ mm}$ per circle $\text{Ø } 260 \text{ mm}$ is the purpose of the research. Samples for the structure study were taken both from the original BLZ and the finished draft axle along the entire cross-section. The greatest unevenness of the liquation background, which is observed in the axial blank manufactured using mode No. 1, is also manifested during the study of the microstructure of railway of the axes obtained by the indicated modes. It was determined that the uniformity of the grain structure is the highest after using mode No. 3 ($\text{Ø } 470 \rightarrow \text{Ø } 260 \text{ mm}$).

*Key words: continuous billet, carbon steel, F-grade steel, hot deformation, liquida-
tion, railway axle, rough axle, rolling.*

Балаханова Тетяна Валеріївна - канд. техн. наук, старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Кононенко Ганна Андріївна - докт. техн. наук, старший дослідник, вчений секретар Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Сафронова Олена Анатоліївна - молодший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Сафронов Олександр Леонідович - молодший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Клинова Ольга Пилипівна - провідний інженер Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Tetyana Balakhanova - candidate. technical of Sciences, senior researcher of the Institute of Ferrous Metallurgy named after Z.I. Nekrasova National Academy of Sciences of Ukraine.

Ganna Kononenko - Dr. technical sciences, senior researcher, scientific secretary of the Institute of Ferrous Metallurgy named after Z.I. Nekrasova National Academy of Sciences of Ukraine.

Olena Safronova - junior researcher at the Institute of Ferrous Metallurgy named after Z.I. Nekrasova National Academy of Sciences of Ukraine.

Oleksandr Safronov - junior researcher at the Institute of Ferrous Metallurgy named after Z.I. Nekrasova National Academy of Sciences of Ukraine.

Olga Klynova - leading engineer of the Institute of Ferrous Metallurgy named after Z.I. Nekrasova National Academy of Sciences of Ukraine.

Г.Я. Вохмянін, О.О. Жульковський, І.І. Жульковська,
В.А. Катан, В.Ю. Клим, І.І. Кузнецов

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ АСИНХРОННИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ АЛГОРИТМІВ ЗАСОБАМИ КОРУТИН ТА ПОТОКІВ C++

Анотація. Одним із механізмів підвищення продуктивності обчислень при комп'ютерному моделюванні є корутини – зручний засіб управління асинхронними операціями, введений у стандарт C++20. Метою роботи є підвищення швидкодії обчислювальних алгоритмів – основи комп'ютерних моделей – за рахунок використанням механізму корутин та потоків даних. В результаті застосування нового, більш ефективного і простого підходу вдалося досягти відносного збільшення швидкості обчислень у 1,94 рази при значній розмірності матриці.

Ключові слова: співпрограма, корутина, асинхронне програмування, багатопоточність, паралельні обчислення, алгоритм, швидкодія.

Постановка проблеми. Багатоядерні системи є найбільш ефективними при застосуванні у великих серверних центрах, а також для хмарних обчислень. Однак, не зважаючи на відому складність програмної реалізації, паралельні обчислення на мультипроцесорах все частіше застосовуються під час комп'ютерного моделювання.

Традиційне програмування часто використовує операції, що блокують основний потік програми до тих пір, поки відповідну операцію не буде завершено. Зазвичай це призводить до уповільнення або простою програмного застосування замість пришвидшення виконання програми чи виконання іншого завдання.

Корутини (coroutines) надають змогу уникати блокування основного потоку шляхом тимчасового призупинення і відновлення програми. Окрім блокуючих операцій використання корутин було б у нагоді при обробці великих масивів даних. Під час призупинення корутини зберігається її стан включно зі значеннями локальних змінних із переходом в очікування завершення відповідної операції. Після завершення операції виконання корутини поновлюється зі збереженого місця, що дає змогу продовжити роботу без блокування потоку вико-

нання [1].

Отже використання корутин поліпшує ефективність програми і особливо, коли остання повинна виконувати безліч блокувальних операцій або значних обчислень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Можливість призупинення та поновлення виконання певних програмних конструкцій вперше описана М. Конвеєм (1963 р.) у публікації про розробку компіляторів [2]. Тоді ж започатковано термін «співпрограма». Д. Кнут (1968 р.) розробив концепцію кооперативних багатозадачних систем (Cooperative Multitasking Systems) [3], яка може бути реалізована саме за допомогою механізму корутин. Він описав, як саме багатозадачні системи можуть бути використані для ефективного розподілу процесорних ресурсів між різноманітними процесами.

Розвиток співпрограм та корутин триває й досі та реалізовано у сучасних системах та мовах програмування високого рівня.

Авторами даної роботи також були проведені дослідження у галузі паралельного та багатопоточного програмування із застосуванням методів розбиття виконання програмного коду між декількома потоками з метою скорочення часу обчислення СЛАР та підвищення ефективності комп'ютерного моделювання [4, 5].

Мета дослідження. Метою даної роботи є підвищення ефективності комп'ютерного моделювання за рахунок збільшення швидкодії обчислювального експерименту на прикладі реалізації сучасними засобами С++ алгоритму множення матриці на вектор з використанням корутин й потоків даних.

Для досягнення поставленої мети перед роботою сформульовані наступні завдання: реалізація послідовного й асинхронного (з розбиттям на два потоки) алгоритмів реалізації методу множення матриці на вектор; проведення порівняльної характеристики продуктивності реалізації послідовного й асинхронного алгоритмів при значній розмірності матриці; вироблення концепції для подальшого розвитку підходів до підвищення швидкодії комп'ютерного моделювання, що застосовує реалізацію асинхронних обчислювальних алгоритмів на мультипроцесорах.

Викладення основного матеріалу дослідження. Як зазначалося, невеликі частини програмного коду, які можна призупинити і відновити через деякий проміжок часу, називаються співпрограмами. Їх характерною особливістю є можливість зберігання свого стану під час призупинення та відновлення програми з місця попередньої зупинки [6, 7]. Співпрограмами можуть бути кору-

тини, генератори числових, символьних та інших послідовностей, ітератори та асинхронні функції.

Корутини, в основі яких лежить концепція співпрограм, є новим механізмом синхронізації, доданим у стандарт C++20 мови програмування C++ [6, 7]. Вони дозволяють використовувати синхронний стиль написання коду в асинхронному середовищі – код, написаний асинхронним чином, виглядає так само, як і синхронний, проте виконується асинхронно. Такий код, у порівнянні з традиційним асинхронним, є більш лаконічним, легким для читання, підтримки та тестування, забезпечує зменшення навантаження на потоки, збільшення продуктивності, має простий та гнучкий синтаксис. Серед недоліків виділяють обмежену підтримку функціональності корутин різними компіляторами C++ [6]. Використання корутини неналежним чином може призвести до некоректного розподілу пам'яті та блокуванню потоку, наслідком чого стане уповільнення роботи програмного застосунку [7].

Корутини та програмні потоки є суттєво різними підходами до організації паралельних обчислень на ЕОМ із багатоядерною архітектурою. Механізм потоків відносять до багатопоточного програмування [8, 9]. При цьому кожен потік має незалежний власний набір даних, викликів, локальних змін тощо. Корутини ж відносять до одного з сучасних засобів асинхронного програмування. Незважаючи на те, що ці концепції реалізують різні підходи до паралельного програмування, їх можна ефективно використовувати разом для досягнення максимальної продуктивності. При цьому програмний код буде розбито на деяку кількість потоків [8, 9], а корутини будуть ефективними при роботі з асинхронною обробкою функцій введення-виведення даних (робота з файлами, мережевими протоколами, веб-сервісами) і з обробкою великих об'ємів даних. Отже використання корутин для реалізації багатопоточної обробки даних шляхом розподілення задач між різними корутинами, працюючими у різних потоках, є цілком допустимим [1, 7]. Необхідно пам'ятати, що для правильного використання потоків та корутин треба враховувати особливості конкретної задачі, що дасть можливість правильно розподіляти ресурси [9]. Інакше продуктивність може знизитись через додаткові витрати на контекстне перемикавання, синхронізацію доступу до ресурсів тощо.

Структура для організації роботи з корутинами містить перелік відповідних функцій з бібліотеки <coroutine>, яка є стандартною у C++20 [6]. Попередні стандарти C++ містять експериментальну версію цієї бібліотеки, що підключається через імпорт <experimental /coroutine>. Використання експериментальної

версії може дуже відрізнятись від основної.

Найголовніші оператори бібліотеки <coroutine>, що використовуються для управління корутинами, представлені наступним чином [6]:

- ключове слово `co_yield` – для передачі управління від поточної корутини до тієї, що зробила виклик;

- ключове слово `co_await` – для призупинення корутини, поки асинхронна операція, від якої корутина чекає відповіді, не буде завершена;

- ключове слово `co_return` – для повернення значення з корутини (звичайний `return` не дозволяє корутині зберегти власний стан та поновити її виконання у майбутньому).

Для створення асинхронної операції й забезпечення ефективного використання ресурсів системи ключові слова `co_yield` та `co_return` зазвичай використовуються разом з оператором `co_await`. До того ж, оператор `co_yield` доцільно використовувати у тих випадках, коли мова йде про генерування послідовності значень певного типу, або організацію «лінивих» обчислень [1, 6].

Всі вищеописані оператори стандарту C++20 разом дозволяють створювати ефективні корутини, що значно спрощує розроблення асинхронних та паралельних застосунків, підвищуючи при цьому продуктивність їхнього виконання.

З метою проведення досліджень розроблено класичний алгоритм множення матриці на вектор та його асинхронну модифікацію з використанням корутин та розбиттям на програмні потоки. Для заміру часу виконання програми була використана стандартна бібліотека <chrono>, яка надає багато можливостей для роботи з часом.

Для проведення експериментів використана наступна інфраструктура EOM: Intel Core i5-10300H (6 cores, 2.5 GHz/ 4.5 GHz); Goodram DDR4 (4 GB) × 4 = 16 GB; Microsoft Windows 11; IDE Microsoft Visual Studio C++; ISO/IEC C++20; <coroutine>.

Тестування проводилось із використанням однопоточного та асинхронного, з розбиттям на два потоки, алгоритмів множення генерованої матриці випадкових значень змінної розмірності на вектор.

З'ясовано, що при невеликій розмірності матриці розроблений асинхронний алгоритм з використанням корутин та розбиттям на два потоки менш ефективний, ніж однопоточний. Це пов'язано з тим, що компілятору необхідний деякий час, аби створити потоки та запустити виконання одночасно. Вже з великою розмірністю помітне зростання швидкодії використання саме асинхрон-

ного алгоритму. При розмірності $n > 1200$ використання асинхронного алгоритму, розбитого на два потоки, гарантовано доцільніше за однопоточний. На рис. 1 зображені порівняльні результати проведених експериментів.

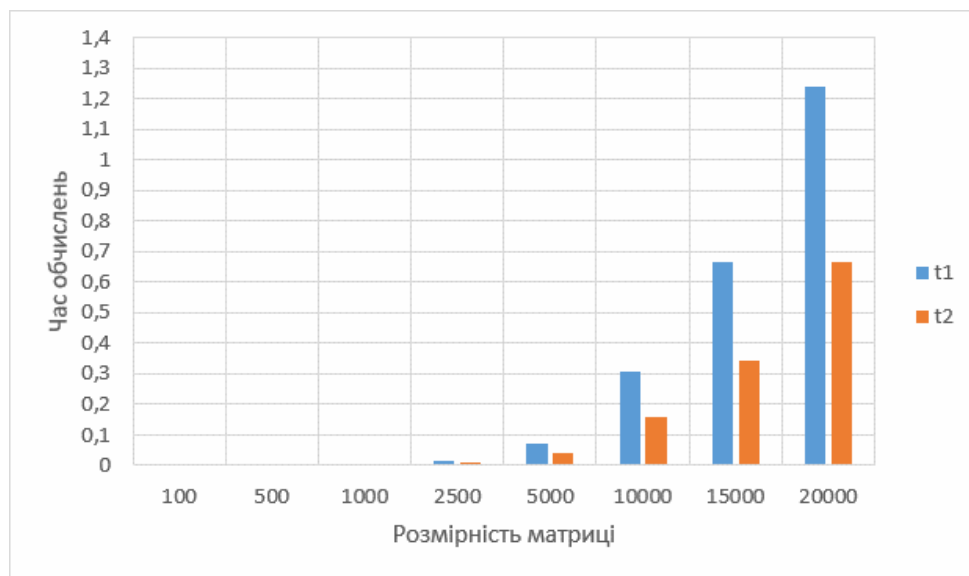


Рисунок 1 – Залежність часу обчислень від розмірності матриці:
t1 – однопоточний; t2 – багатопоточний

Висновки. В результаті роботи розроблено алгоритм множення матриці на вектор та його модифікований асинхронний варіант із використанням механізму корутин та розбиттям на два потоки даних, за рахунок якого вдалося досягти збільшення швидкості обчислень у 1,94^орази при розмірності матриці 15000 ($2,25 \times 10^6$ елементів). Отримані дані кореспондуються з результатами подібних досліджень проблеми підвищення ефективності комп'ютерного моделювання з використанням альтернативних програмних та апаратних засобів. Таким чином доведено, що новий спосіб вирішення проблем асинхронного програмування надає більш ефективний та простий механізм управління асинхронними операціями. Результати роботи успішно використано при розробці інформаційно-моделюючої системи [10], створеної на основі авторської методики математичного моделювання процесів комбінованого теплообміну [11].

ЛІТЕРАТУРА

1. Andrist B. C++ High Performance: Master the art of optimizing the functioning of your C++ code / B. Andrist, V. Sehr, B.°Garney. – 2nd Edition: textbook. – 2020. – 540 p.
2. Conway Melvin E. Design of a separable transition-diagram compiler/ Melvin E. Conway // Communications of the ACM. – 1963. – Vol. 6. – № 1. – P.°396 – 408.
3. Knuth Donald E. Fundamental algorithms, The art of computer programming /

- Donald E. Knuth. – Publisher: Addison-Wesley, 1968. – Vol.1.°– 634 p.
4. Zhulkovskiy O.O. Evaluating the effectiveness of the implementation of computational algorithms using the OpenMP standard for parallelizing programs / O. O. Zhulkovskiy, I. I. Zhulkovska, V. V. Shevchenko // Informatics and Mathematical Methods in Simulation. – 2021. – Vol.11. – №4. – P. 268 – 277.
DOI: 10.15276/imms.v11.no4.268
5. Zhulkovskiy O. O. Evaluation of the efficiency of the implementation of parallel computational algorithms using the <thread> library in C++ / O.°O.°Zhulkovskiy, I. I. Zhulkovska, V. V. Shevchenko, H. Ya. Vokhmianin // Computer Systems and Information Technologies. – 2022. – № 3. –P. 49°–°55. DOI: 10.31891/csit-2022-3-6
6. Fertig A. Programming with C++20: Concepts, Coroutines, Ranges, and more/ A. Fertig, F. Panter. – Textbook. – 2021. – 333 p.
7. Browning J. Burton. C++20 Recipes: A Problem-Solution Approach / J.°Burton Browning, B. Sutherland. – 2nd Edition: textbook. – 2020. – 657 p.
8. Williams A. C++ Concurrency in Action: Practical Multithreading/ A.°Williams. – Textbook. – 2012. – 528 p.
9. Mastering Posch M. C++ Multithreading: Write robust, concurrent, and parallel applications / Posch M. Mastering. – Textbook. – 2017. – 246 p.
10. Zhulkovskii O.A. Information-Modeling Forecasting System for Thermal Mode of Top Converter Lance / O.°A. Zhulkovskii, S.°P. Panteikov, I.°I.°Zhulkovskaya // Steel in Translation. – 2022. – Vol. 52. – № 5. –P. 495°–°502.
DOI: 10.3103/S0967091222050138
11. Zhulkovskiy O.O. Features of Mathematical simulation of the processes of combined heat transfer in waveguides / O.O. Zhulkovskiy, Iu.V. Savchenko, I.°I. Zhulkovska et al. // Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022. –P.°452°–°456.
DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005676

REFERENCES

1. Andrist B. C++ High Performance: Master the art of optimizing the functioning of your C++ code / B. Andrist, V. Sehr, B.°Garney. – 2nd Edition: textbook. – 2020. – 540 p.
2. Conway Melvin E. Design of a separable transition-diagram compiler/ Melvin E. Conway // Communications of the ACM. – 1963. – Vol. 6. – № 1. – P.°396 – 408.
3. Knuth Donald E. Fundamental algorithms, The art of computer programming / Donald E. Knuth. – Publisher: Addison-Wesley, 1968. – Vol.1.°– 634 p.
4. Zhulkovskiy O.O. Evaluating the effectiveness of the implementation of computational algorithms using the OpenMP standard for parallelizing programs / O. O. Zhulkovskiy, I. I. Zhulkovska, V. V. Shevchenko // Informatics and Mathematical Methods in Simulation. – 2021. – Vol.11. – №4. – P. 268 – 277.

DOI: 10.15276/imms.v11.no4.268

5. Zhulkovskiy O. O. Evaluation of the efficiency of the implementation of parallel computational algorithms using the <thread> library in C++ / O.°O.°Zhulkovskiy, I. I. Zhulkovska, V. V. Shevchenko, H. Ya. Vokhmianin // Computer Systems and Information Technologies. – 2022. – № 3. – P. 49°–°55. DOI: 10.31891/csit-2022-3-6
6. Fertig A. Programming with C++20: Concepts, Coroutines, Ranges, and more/ A. Fertig, F. Panter. – Textbook. – 2021. – 333 p.
7. Browning J. Burton. C++20 Recipes: A Problem-Solution Approach / J.°Burton Browning, B. Sutherland. – 2nd Edition: textbook. – 2020. – 657 p.
8. Williams A. C++ Concurrency in Action: Practical Multithreading/ A.°Williams. – Textbook. – 2012. – 528 p.
9. Mastering Posch M. C++ Multithreading: Write robust, concurrent, and parallel applications / Posch M. Mastering. – Textbook. – 2017. – 246 p.
10. Zhulkovskii O. A. Information-Modeling Forecasting System for Thermal Mode of Top Converter Lance / O.°A. Zhulkovskii, S.°P. Panteikov, I.°I.°Zhulkovskaya // Steel in Translation. – 2022. – Vol. 52. – № 5. – P. 495°–°502.
DOI: 10.3103/S0967091222050138
11. Zhulkovskiy O.O. Features of Mathematical simulation of the processes of combined heat transfer in waveguides / O.O. Zhulkovskiy, Iu.V. Savchenko, I.°I. Zhulkovska et al. // Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022. – P.°452°–°456.
DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005676

Received 31.03.2023.

Accepted 05.04.2023.

Evaluation of the efficiency of implementation of asynchronous computing algorithms using coroutines and threads in C++

Modern multi-core systems are most effective when used in large server centers and for cloud computing. However, despite the known complexity of software implementation, parallel computing on multiprocessors is increasingly used in computer modelling.

Advanced mechanisms of synchronous and multithreaded programming are increasingly used to improve the productivity of numerical studies, reducing the time of computer models implementation. One such mechanism is coroutines, a convenient tool for managing asynchronous operations introduced in the C++20 standard. A special feature of coroutines is the ability to suspend a function at a certain stage, saving its state, and after some time resume its execution from the previous stop.

The aim of this research is to improve the performance of computer modelling by using coroutines and data threads.

As a result of the work, a test algorithm for multiplying a matrix by a vector and its modified asynchronous version using the coroutine mechanism and splitting into two data threads was developed, which allowed to achieve 1.94 times increase in the comput-

ing speed when the matrix dimension is 15000 (2.25×10^6 elements). It has been found that at a small matrix dimension, the developed asynchronous algorithm using coroutines and splitting into two threads is less efficient than the single thread algorithm. This is due to the fact that the compiler needs some time to create threads and start execution simultaneously. With a large dimensionality, the performance of the asynchronous algorithm increases significantly. With a matrix dimension of more than 1200, the use of an asynchronous algorithm divided into two threads is guaranteed to be more efficient than a single-threaded.

The data obtained are consistent with the results of similar studies of the problem of increasing the efficiency of computer modelling using alternative software and hardware.

The new method of solving the problems of asynchronous programming provides a more efficient and simple mechanism for managing asynchronous operations.

Вохмянін Гліб Ярославович – здобувач вищої освіти бакалаврського рівня, Дніпровський державний технічний університет.

Жульковський Олег Олександрович – доцент кафедри програмного забезпечення систем, Дніпровський державний технічний університет.

Жульковська Інна Іванівна – доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Університет митної справи та фінансів.

Катан Володимир Олександрович – доцент кафедри економічного моделювання, обліку та статистики, Дніпровський національний університет ім. Олеса Гончара.

Клим Вікторія Юріївна – доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Університет митної справи та фінансів.

Кузнецов Ілля Ігоревич – магістр, Дніпровський державний технічний університет.

Vokhmianin Hlib – Student, Dniprovsky State Technical University.

Zhulkovskyi Oleg – Associate Professor of Department of Software Systems, Dniprovsky State Technical University.

Zhulkovska Inna – Associate Professor of Department of Cybersecurity and Information Technologies, University of Customs and Finance.

Katan Volodymyr – Associate Professor of Department of Economic Modeling, Accounting and Statistics, Oles Honchar Dnipro National University.

Klym Viktoriia – Associate Professor of Department of Cybersecurity and Information Technologies, University of Customs and Finance.

Kuznetsov Illia – Master, Dniprovsky State Technical University.

О.П. Гожий, О.О. Жебко, І.О. Калініна, Т.А. Ганніченко

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЛАСИФІКАЦІЇ НА ОСНОВІ АНСАМБЛЕВИХ МЕТОДІВ

Анотація. В роботі на основі методів машинного навчання досліджено вирішення завдання класифікації за допомогою дворівневої структури ансамблів моделей. Запропоновано архітектуру інтелектуальної системи класифікації. Для покращення результатів прогнозування застосовано ансамблевий підхід: кілька базових моделей навчались для вирішення однієї і тієї ж проблеми, з подальшим агрегуванням і покращенням отриманих результатів. Для пошуку компромісу між зміщенням та дисперсією, властивих моделям машинного навчання, було використано дворівневу структуру ансамблю. На першому рівні реалізовано ансамбль на основі стекінгу. На другому - на основі беггінгу. Проведено дослідження базових моделей класифікації та ансамблевих моделей на основі стекінгу та беггінгу, а також метрик оцінки ефективності використання базових класифікаторів та моделей першого та другого рівня. Визначено наступні параметри для усіх наведених методів у роботі: точність прогнозування та коефіцієнт помилок, Каппа-статистика, чутливість та специфічність, точність та повнота, F-міра та площею під ROC-кривою. Визначено ефективність ансамблю моделей в порівнянні з кожною базовою моделлю. Ключові слова: Класифікація, ансамблеві моделі, стекінг, бустінг, бегінг, дворівнева архітектура, показники ефективності.

Вступ. Стрімкий розвиток технологій машинного навчання ініціював розвиток нових методів та алгоритмів, які більш ефективно вирішують задачі інтелектуального аналізу даних та прогнозування. Головною особливістю методів машинного навчання є не прямий розв'язок задачі, а навчання на множині прикладів, що дозволяє адаптувати ці методи для вирішення конкретних завдань обробки великих обсягів даних та виявляти в них нові знання. Для реалізації технологій машинного навчання використовуються різноманітні методи, такі як методи математичної статистики, ймовірнісні методи, чисельні методи, методи оптимізації, теорії ймовірностей, теорії графів, різні методи роботи з даними тощо [1-4].

Одними з ефективних методів для вирішення завдань регресії та класифікації є використання ансамбля моделей [5-7]. Застосування ансамблей це про-

цес, у якому різні та незалежні моделі поєднуються для отримання кращого результату. При підборі оптимальної моделі необхідно враховувати компроміс між зміщенням та дисперсією.

Зміщення – це нездатність моделі засвоїти достатньо відомостей про зв'язок між модельними ознаками та мітками, а дисперсія відображає нездатність моделі узагальнити на нових прикладах. Модель з високим зміщенням дуже зпрощує зв'язок і вважається недопідігнаною. Модель з високою дисперсією занадто пристосувалась до тренувальних даних і вважається перенавченою [8]. Будь-яка модель має за мету отримати низькі зміщення і дисперсію, але на практиці досягти і того, і іншого дуже важко. Цей феномен відомий як компроміс між зміщенням та дисперсією.

Техніка ансамблювання, тобто комбінування різних моделей для створення однієї «оптимальної», є сучасним технічним прийомом, що дозволяє пом'якшити компроміс між зміщенням та дисперсією. Це дає можливість не покладатися на одну єдину модель, яка може бути перенавчена або мати інші недоліки [9].

В данній роботі досліджується процес використання ансамблевих моделей для побудови ефективного класифікатора. Для вирішення задачі класифікації використовуються різноманітні методи і моделі машинного навчання, для реалізації програмних модулів використовується мова програмування *R*, та середовище розробки *RStudio*.

Постановка проблеми. Метою данної роботи є дослідження ансамблевих методів при вирішенні завдань класифікації та розробка інтелектуальної системи класифікації на основі ансамблів моделей.

Аналіз останніх досліджень. Для побудови ансамблю використовується кілька технік агрегування результатів базових моделей, кожен з яких забезпечує різну точність діагностики. *Bagging* [10,11], *boosting* [10,12] і *stacking* [10,13] є найбільш поширеними підходами до побудови ансамблів.

Bagging – це метод паралельного навчання базових моделей, який підходить для різних моделей, що вважаються незалежними одна від одної. Використання методу *bagging* сприяє зменшенню дисперсії в базових моделях. В роботі [14] досліджені різні аспекти процесу *Bagging*. Метод генерує вибіркові дані для навчання з набору даних. Це досягається шляхом випадкової вибірки із заміною вихідного набору даних. Вибірка із заміною може повторювати деякі спостереження в кожному новому навчальному наборі даних. Кожен елемент у *Bagging* з однаковою ймовірністю з'явиться в новому наборі даних. В роботі [11]

цей тип ансамблю використовується для паралельного навчання кількох моделей. Розраховується середнє значення всіх прогнозів з різних моделей ансамблю. Під час класифікації враховується більшість голосів, отриманих за допомогою механізму голосування. Різні варіанти побудови ансамблей на основі *Bagging* представлено в роботах [15,16].

В літературних джерелах широко висвітлюється метод створення ансамблей *Boosting* [12,14]. Це послідовний метод агрегування, який ітеративно регулює вагу спостереження відповідно до останньої класифікації. Якщо спостереження неправильно класифіковано, це збільшує вагу цього спостереження. Термін «бустинг» стосується алгоритмів, які перетворюють слабку модель на сильнішу. Це зменшує помилку зміщення та створює надійні прогностичні моделі [17]. Точки даних, неправильно спрогнозовані під час кожної ітерації, виявляються, а їх ваги збільшуються. В роботі [18] алгоритм *Boosting* призначає ваги кожній отриманій моделі під час навчання. Моделі з кращими результатами прогнозування даних навчання присвоєно вищу вагу. Якщо наданий вхід є невідповідним, його вага збільшується. Мета, що стоїть за цим, полягає в тому, щоб майбутня гіпотеза з більшою ймовірністю належним чином класифікувала його шляхом об'єднання всього набору, щоб нарешті перетворити слабкі моделі на моделі з кращою ефективністю [19].

Третім методом створення ансамблей є *Stacking*. Ця методика ансамблю працює шляхом застосування комбінованих прогнозів кількох слабких моделей в рамках *метамоделі*, щоб можна було досягти кращих результатів прогнозування [13]. *Stacking* також відомий як узагальнення з об'єднанням і є розширеною формою методики ансамблю усереднення моделі, в якій усі підмоделі однаково беруть участь відповідно до їх ваг продуктивності та створюють нову модель із кращими прогнозами. Ця нова модель розташована поверх інших, це причина, чому вона віднесена до *Stacking* [15].

В роботах [6,9] архітектури стекінгової моделі розроблені таким чином, що вони складаються з двох або більше базових моделей/моделей та метамоделі, яка поєднує прогнози базових моделей. Ці базові моделі називають моделями рівня 0, а метамодель — моделлю рівня 1. В роботах [18-20] представлені результати досліджень багаторівневих структур ансамблей моделей. В роботі [20] методи сумісного ансамблю включають вхідні (навчальні) дані, моделі первинного рівня, прогноз первинного рівня, модель вторинного рівня та остаточний прогноз. Автори пропонують систему підтримки прийняття рішень, в основі якої - дворівневий класифікатор, що на обох рівнях агрегації використовує

зважену суму. Ваги розраховуються на основі значення F -міри кожного з базових алгоритмів.

Опис набору даних. Для створення інтелектуальної системи класифікації на основі ансамблів моделей було використано набір даних E-Commerce *Shipping Data*. Мета моделі – виявити чинники, пов'язані з ризиком невчасної доставки попередніх замовлень клієнтам та інформацію про одержувачів товарів. Дані з такими характеристиками доступні в репозиторії машинного навчання *Kaggle*. Набір даних містить інформацію про дані доставки, отримані від міжнародної E-Commerce компанії Індії [21].

Набір даних, включає 10999 прикладів доставки товару, а також 12 змінних. Це набір числових і номінальних ознак, що визначають характеристики товару та клієнта. Дані містять таку інформацію, як: ідентифікаційний номер клієнтів; складський блок; спосіб; дзвінки у службу підтримки клієнтів (кількість дзвінків, здійснених клієнтами щодо запиту про відправлення товару); рейтинг клієнтів (від 1 до 5); вартість продукту (вартість продукту в доларах США); попередні покупки (кількість попередніх покупок); важливість продукту (низький, середній, високий); стать покупця (чоловіча та жіноча); знижка; вага в грамах; доставка товару.

Архітектура інтелектуальної системи класифікації. Архітектура розробленої інтелектуальної системи класифікації представлена на рис.1. Система складається з підсистеми збору та зберігання даних, блока попередньої обробки та аналізу даних, блока побудови та навчання базових моделей та блоку побудови і оцінювання ансамблів моделей, який реалізовано на основі дворівневого підходу. Блок попередньої обробки та аналізу даних виконує: аналіз структури набору даних, виявлення нечислових та відсутніх значень, перекодування нечислових ознак, аналіз взаємозв'язку між змінними, відбір ознак, нормалізація числових даних. Далі здійснюється розподіл набору даних на тестову і тренувальну вибірку [22].

Важливим етапом більшості ансамблевих методів є вибір оптимального набору моделей включення до ансамблю. Дві умови, які мають бути виконані для досягнення ансамблю гарної якості, — це точність та різноманітність прогнозів. Тому в інтелектуальній системі в якості базових моделей представлено оптимальну комбінацію класифікаторів, що складається з Decision Tree, NB, LDA, QDA, LR, SVM, RF, KNN, ANN та оцінюється їх якість. В блоці побудови та навчання базових моделей виконуються обчислення на попередньо опрацьованих даних. Кожен окремих класифікатор навчається з використанням навча-

льних даних. Для підвищення точності в блоці побудови і оцінювання ансамблі моделей формуються на двох рівнях та оцінюється якість остаточного прогнозу [23-25].

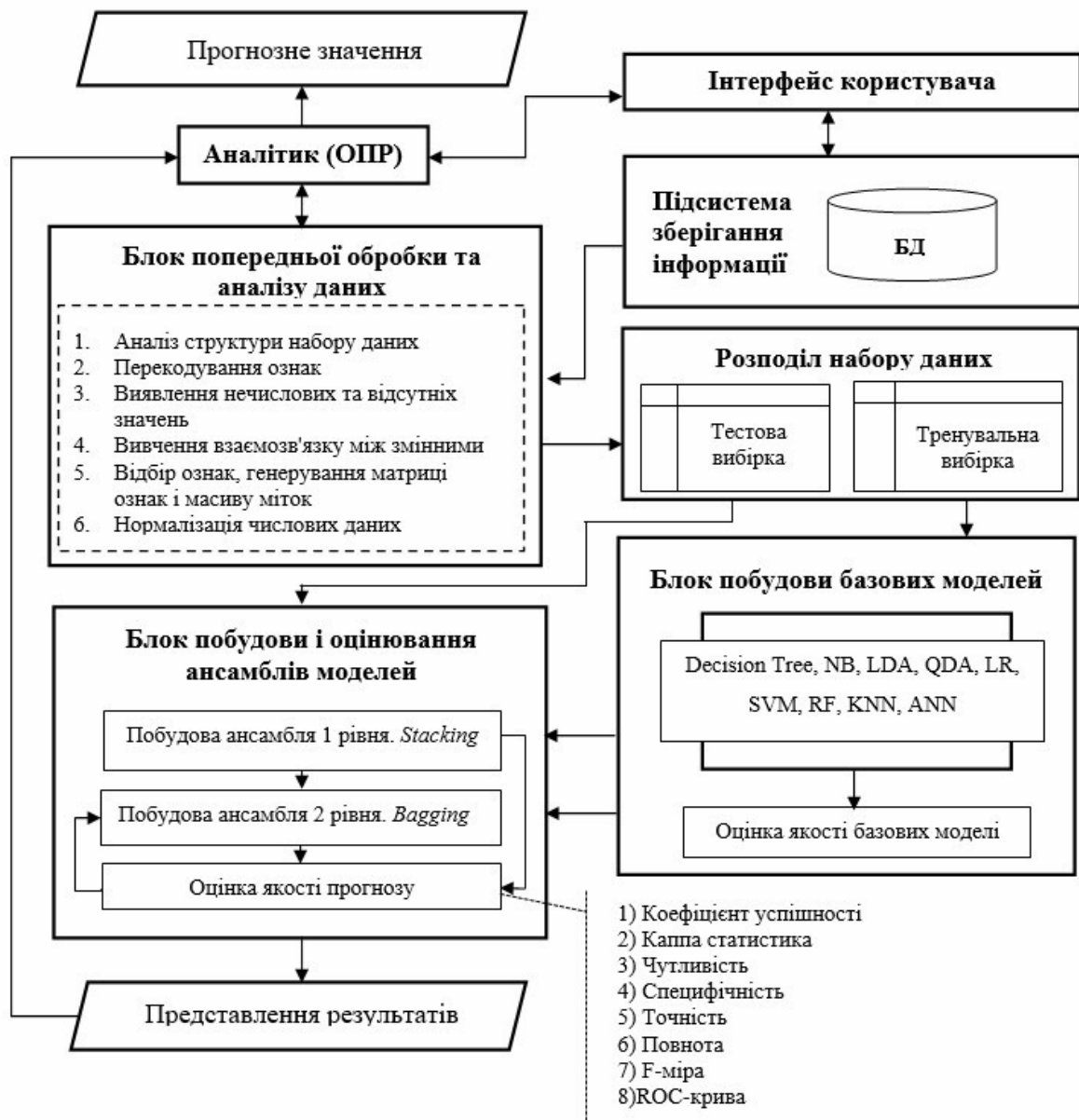


Рисунок 1– Архітектура інтелектуальної системи класифікації

Попередня обробка даних. Підготовка до моделювання. Попередня обробка даних включає в себе перетворення категоріальних даних в числові, нормалізацію даних, перевірку на нечислові та відсутні значення, перевірку на наявність аномальних значень та відбір ознак.

Першим кроком відбувається перетворення факторних змінних набору *Warehouse_block* ($A \rightarrow 1, B \rightarrow 2, C \rightarrow 3, D \rightarrow 4, E \rightarrow 5$), *Mode_of_Shipment* ($Flight \rightarrow 1, Ship \rightarrow 2, Road \rightarrow 3$), *Product_Importance* ($high \rightarrow 1, medium \rightarrow 2, low \rightarrow 3$) та *Gender*

($F \rightarrow 1$, $M \rightarrow 2$) на числові, оскільки для більшості моделей машинного навчання на вхід подаються числові значення, а також для стандартизації значень атрибутів з метою отримання кращої точності навчання. Наступним кроком виконується нормалізація даних за допомогою мінімаксного методу. Змінні *Cost_of_the_Product*, *Discount_offered* та *Weight_in_gms* мають достатньо великі значення та всі дані з набору приводяться до загальної шкали без втрати інформації про відмінність діапазонів.

Нечислові та відсутні значення в наборі даних перевіряються за допомогою функцій *NaValue* та *BlankValue*. При перевірці з'ясовано, що в обраному для досліджень наборі даних немає нечислових чи відсутніх значень в жодному атрибуті. Аномальні значення у наборі даних також відсутні.

Вектор *Reached.on.Time_Y.N* вказує на те, чи змогла компанія вчасно чи з затримкою доставити певний товар покупцю. Загалом приблизно 60 % товару із цього набору даних було доставлено невчасно.

Підготовлений для моделювання набір даних поділено на дві частини: тренувальний набір для побудови базової моделі класифікатора та тестовий набір для оцінки ефективності моделі нових даних. Використано 90% даних для навчання та 10% – для тестування, що дало 1999 записів для моделювання нових претендентів.

Вирішення задачі класифікації за допомогою ансамблю моделей дворівневої класифікації. Для досягнення найкращої якості вирішення завдань класифікації були використано ансамблеві методи багаторівневої класифікації двох різних типів: *stacking* та *bagging*. Їх ідея полягає у використанні декількох моделей на різних шарах [20]. Одна з переваг даного методу полягає в тому, що забезпечується гнучкість вибору вирішальних функцій, що знаходять «приховану залежність» між об'єктами навчальної вибірки та відповідними значеннями їх класів (через різні комбінації вирішальних функцій базових класифікаторів, що входять до складу ансамблевого). Більшість моделей мають задовільну якість роботи, але результат все ще потребує покращення, оскільки компанія прагне покращити сервіс надавання послуг з продажу та доставки товарів. Тому для покращення результату будується дворівнева ансамблева модель. У якості вхідних даних обираються тестові оцінки якості базових моделей та додаються їх до тестового набору.

На *першому шарі* використано метод стекінгу на основі логістичної регресійної моделі в якості метамоделі. Модельний стекінг є ефективним методом ансамблювання різнорідних за типом моделей. Коли прогнози різних мо-

делей об'єднуються за допомогою стекінгу, бажано, щоб прогнози, що зроблені базовими моделями, мали низьку кореляцію. Це означає, що моделі є коректними та дозволяє новому класифікатору з'ясувати, як отримати найкраще від кожної моделі для покращеного результату.

Прогнози, які сформовані за допомогою базових моделей, використовуються як вхідні дані для навчання на першому шарі. В якості базових моделей першого шару обрано: дерева рішень (*DecisionTree*), наївний Баєсівський класифікатор (*NB*), квадратичний дискримінантний аналіз (*QDA*), логістична регресія (*LR*), метод опорних векторів (*SVM*), модель випадкового лісу (*RF*).

Основні відомості ансамблю моделей першого шару: логістична регресія в якості метамоделі, 10 предикторів, два класи результуючої змінної ("no" та "yes"). Отримана точність тренувальної моделі 69,3 % та каппа-статистика 0,42. За попереднім оцінюванням отримали покращення точності класифікації в порівнянні з окремими базовими класифікаторами. Остаточне оцінювання відбувалось на тестових даних. Результат показує, що помилка становить 1399 зі 1999, або 30 %. Отже, точність класифікації на тестових даних – 70 %. Невчасно доставлені товари вірно передбачені 607 рази, у той же час невірно класифіковані 25 разів. Товари, які були доставлені вчасно вірно передбачені 792 разів, невірно – 575 рази. У результаті 25 реальних значень "no" були помилково класифіковані як "yes" (хибно-позитивні спрацьовування), а 575 значення "yes" були помилково класифіковані як "no" (хибно-негативні спрацьовування). В результаті об'єднання різних базових моделей в ансамбль моделі за допомогою стекінгу, вдалось підвищити точність моделі на першому рівні до 70 %.

На *другому шарі* було використано метод беггінгу на основі алгоритму **Bagged CART**. Алгоритм створює *N* регресійних дерев, використовуючи *M* початкових навчальних наборів і усереднює отримані прогнози. Ці дерева вирощуються глибоко та не обрізаються. Кожне окреме дерево має високу дисперсію, але низьке зміщення. Усереднення *N* дерев зменшує дисперсію. Прогнозованими значеннями для спостережень є мода. Одним із недоліків *Bagged Trees* є те, що невелика кількість додаткових навчальних спостережень може різко змінити ефективність передбачення вивченого дерева.

В якості базових моделей другого шару обрано: модель першого рівня (*Stacking LR*), модель штучних нейронних мереж (*ANN*); модель лінійного дискримінантного аналізу (*LDA*) та модель на основі методу найближчого сусіда (*KNN*). Основні відомості ансамблю моделей другого шару: метод *Bagged CART*, 4 предиктора, два класи результуючої змінної: "no" та "yes". Отримана точ-

ність тренувальної моделі 66,3 % та каппа-статистика 0,33. Результат оцінки на тестових даних показує, що помилка становить 232 зі 1999, або 11 %. Отже, точність класифікації на тестових даних – 88 %. Таким чином невчасно доставлені товари вірно передбачені 959 рази, у той же час невірно класифіковані 9 разів. Товари, які були доставлені вчасно вірно передбачені 808 разів, невірно – 223 рази. У результаті 9 реальних значень “no” були помилково класифіковані як “yes” (хибно-позитивні спрацьовування), а 223 значення “yes” були помилково класифіковані як “no” (хибно-негативні спрацьовування).

Слід звернути увагу, що у тестових даних модель вірно спрогнозувала 959 з 1182 реальних невчасних доставок, тобто 81,1%. Отже, на другому етапі в результаті об'єднання деяких базових моделей та моделі стекінгу в ансамбль моделей за допомогою беггінгу, вдалось підвищити точність моделі на другому рівні до 88 %.

Оцінка ефективності розроблених моделей класифікації. Існує багато способів виміряти ефективність класифікатора, проте найкращий показник – той, який визначає, чи є класифікатор успішним, коли застосовується за прямим призначенням. Важливо визначити показники ефективності, які показуватимуть корисність, а не просто точність [26]. Альтернативні показники ефективності отримуємо із матриці невідповідностей.

Матриця невідповідностей – це таблиця, яка класифікує прогнози залежно від цього, чи відповідають вони фактичним значенням. Один із вимірів таблиці – це можливі категорії прогнозованих значень, а друге – ті самі категорії для реальних значень. Якщо прогнозоване значення збігається з реальним, класифікація правильна. Правильні прогнози розміщуються у матриці невідповідностей щодо діагоналі. Інші комірочки матриці відповідають випадкам, коли прогнозоване значення відрізняється від реального. Показники ефективності для моделей класифікації засновані на кількості прогнозів, що потрапляють на діагональ та за її межі.

Значення показників ефективності, що враховують здатність моделі відрізнити один клас від інших (*точність прогнозування, каппа-статистика, чутливість та специфічність, точність та повнота, F- міра та площа під ROC – кривою*) наведено в таблиці 1. У якості базових моделей обрано моделі: дерева рішень (Decision Tree), наївний Баєсів класифікатор (NB), лінійний дискримінантний аналіз (LDA), квадратичний дискримінантний аналіз (QDA), логістична регресія (LR), метод опорних векторів (SVM), метод найближчого сусіда (KNN), штучні нейронні мережі (ANN) та модель випадкового лісу (RF).

Показники ефективності моделей

Тип моделі	Коефіцієнт ус- пінності (accuracy)	Каппа- статистика (Катта)	Чутливість (sensitivity)	Специфічність (specificity)	Точність (precision)	Повнота (recall)	F-міра (F-measure)	ROC-крива (AUC ROC)
Decision Tree	0,7	0,44	0,51	0,98	0,97	0,51	0,67	0,75
NB	0,67	0,36	0,59	0,8	0,81	0,59	0,68	0,69
QDA	0,67	0,38	0,45	0,98	0,97	0,45	0,61	0,72
LR	0,6	0,27	0,56	0,7	0,58	0,6	0,57	0,64
SVM	0,67	0,35	0,6	0,77	0,79	0,67	0,68	0,68
RF	0,67	0,34	0,63	0,72	0,96	0,51	0,69	0,68
Stacking (LR)	0,7	0,44	0,51	0,96	0,96	0,51	0,67	0,74
LDA	0,64	0,27	0,68	0,59	0,71	0,68	0,69	0,63
KNN	0,6	0,17	0,67	0,5	0,66	0,05	0,67	0,28
ANN	0,33	-0,45	0,05	0,44	0,04	0,63	0,04	0,58
Bagging	0,88	0,77	0,81	0,98	0,98	0,81	0,89	0,9

Аналіз таблиці показує, що найкращу оцінку специфічності та точності мають дерева рішень та метод квадратичного дискримінантного аналізу, найвищу точність мають дерева рішень. F-міра має найвищий показник для результатів для результатів випадкового лісу та лінійного дискримінантного аналізу, а площа під ROC-кривою найбільша для результатів класифікації з використанням дерев рішень. Загалом, базові класифікатори показали середній результат на даному наборі даних та результати потребують покращення. Найгірші результати дає штучна нейронна мережа.

Використовуючи стекінг для комбінування шести не дуже високих результатів базових класифікаторів, покращено загальний результат. Навчання моделі стекінгу відбувалося шляхом використання логістичної регресії (*glm*). Використовуючи беггінг для комбінування трьох не дуже високих результатів базових класифікаторів та результату роботи моделі першого рівня – стекінгу, значно покращено загальний результат по всім метрикам оцінювання. Навчання моделі беггінгу відбувалося шляхом використання беггінгу дерев рішень (*treebag*).

Висновки. Проведено дослідження базових методів прогнозування та ансамблевих моделей на основі стекінгу та беггінгу. Досліджені метрики оцінки ефективності використання базових класифікаторів, моделей першого та дру-

гого рівнів. Визначено наступні параметри для усіх наведених методів у роботі: точність прогнозування та коефіцієнт помилок, Каппа-статистика, чутливість та специфічність, точність та повнота, F-міра та площею під ROC-кривою.

Було визначено та описано ключові характеристики якості моделей, вибір метрики, підбір базових (слабких) моделей, підбір параметрів для базових моделей та ансамблевих методів. Проведено процес збору даних, їх аналіз та інтерпретацію, виконано попередня обробка даних та розділено набір на тренувальну та тестову вибірки й згенеровано входні змінні на основі поведінкових даних клієнтів. Наведено результати застосування простих класифікаторів та ансамблю моделі дворівневої класифікації та виконано оцінку ефективності розроблених моделей класифікації.

Метрики оцінки якості роботи базових класифікаторів показали опосередковані результати, що потребують покращення. Використовуючи стекінг для комбінування шести не дуже високих результатів базових класифікаторів, було покращено загальний результат. Використовуючи беггінг для комбінування трьох не дуже високих результатів базових класифікаторів та результату роботи моделі першого рівня – стекінгу, значно покращено загальний результат по всім метрикам оцінювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Marsland S. Machine Learning: An Algorithmic Perspective. Palmerston North: Massey University, 2015. 452 p.
2. Wang L., Cheng L., Zhao G. Machine Learning for Human Motion Analysis. Anhui: IGI Global, 2009. 318 p.
3. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. California: Springer–Verlag, 2009. 746 p.
4. Artificial Intelligence: A Modern Approach.
URL: <https://towardsdatascience.com/understanding-the-bias-variance-tradeoff> (дата звернення: 20.12.2022).
5. Opitz D., Maclin R. Popular ensemble methods: An empirical study: journal of Artificial Intelligence Research No. 11. El Segundo, 1999. P. 169–198.
6. Ensemble Methods to Optimize Machine Learning Models.
URL: <https://hub.packtpub.com/ensemble-methods-optimize-machine-learning-models> (дата звернення: 20.12.2022).
7. Бармак О. В., Крак Ю. В., Манзюк Е. А. Характеристика для вибору моделей у ансамблі класифікаторів: науковий журнал “Проблеми програмування”. Київ, 2018. С. 171–179.

8. Understanding the Bias–Variance Tradeoff

URL: <http://scott.fortmannroe.com/docs/BiasVariance.html> (дата звернення: 20.12.2022).

9. Dietterich T., Ensemble Methods in Machine Learning.

URL: <http://web.engr.oregonstate.edu/~tgd/publications/mcs-ensembles.pdf> (дата звернення: 25.12.2022).

10. Ensemble methods: bagging, boosting and stacking. URL: <https://towardsdatascience.com/ensemble-methods-bagging-boosting-andstacking-c9214a10a205> (дата звернення: 27.12.2022).

11. Moretti F., Pizzuti S., Panzieri S., Annunziato M., Urban traffic flow forecasting through statistical and neural network bagging ensemble hybrid modeling, *Neurocomputing* (2015).

12. Kim M.J., Kang D.K., Kim H.B. Geometric mean based boosting algorithm with over-sampling to resolve data imbalance problem for bankruptcy prediction, *Expert Syst. Appl.* 42 (3) (2015) 1074–1082.

13. Kang S., Cho S., Kang P. Multi-class classification via heterogeneous ensemble of one-class classifiers, *Eng. Appl. Artif. Intell.* 43 (2015) 35–43.

14. Бустінг і беггінг як методи формування ансамблей моделей / Вербівський Д. С., Карплюк, С. О., Фонарюк, О. В., Сікора, Я. Б. Житомир: ЖДУ ім. Івана Франка, 2021. С. 163-169.

15. Zhi–Hua Zhou Ensemble Learning. URL: <https://cs.nju.edu.cn/zhoush/zhoush.files/publication/springerEBR09.pdf> (дата звернення: 20.12.2022).

16. Shah B.R., Lipscombe L.L. Clinical diabetes research using data mining: a Canadian perspective, *Can. J. Diabetes* 39 (3) (2015) 235–238.

17. Improvements on Cross–Validation: The 632+ Bootstrap Method. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1997.10474007#.U2o7MVdMzTo> (дата звернення: 22.12.2022).

18. Ahmad A., Brown G. Random ordinality ensembles: ensemble methods for multi-valued categorical data, *Inf. Sci.* 296 (2015) 75–94.

19. Sluban B., Lavrac N. Relating ensemble diversity and performance: a study in class noise detection, *Neurocomputing* 160 (2015) 120–131.

20. Bashir S., Qamar U., Khan F.H. IntelliHealth: A medical decision support application using a novel weighted multi-layer classifier ensemble framework. *Journal of Biomedical Informatics.* – 2016. – vol.59. – pp.185- 200.

21. E–Commerce Shipping DataSet.

URL: <https://www.kaggle.com/datasets/+prachi13/customer-analytics> (дата звернення: 15.11.2022)

22. Калініна І.О., Гожий О.П. Дослідження ефективності методів класифікації при прогнозуванні в задачах машинного навчання. Управління розвитком складних систем. Київ, 2021. № 46. С. 173 – 180, [dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2021.46.173-180](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.46.173-180).

23. Maniruzzaman M., Rahman MJ., Ahammed B. Classification and prediction of diabetes disease using machine learning paradigm. Health information science and systems, Vol. 8. Texas, 2020. P. 1–14.

24. Бідюк П.І., Кузнєцова Н.В., Терентьєв О.М. Система підтримки прийняття рішень для аналізу даних. Київ: Наукові вісті НТУУ «КПІ», 2011. С. 48–61.

25. Zhan Zh. Introduction to machine learning: k-nearest neighbors. Vienna: Ann Transl Med, 2016. 218 p.

26. Метрики в задачах машинного навчання.

URL: <https://habr.com/ru/company/ods/blog/328372> (дата звернення: 20.12.2022).

REFERENCES

1. Marsland S. Machine Learning: An Algorithmic Perspective. Palmerston North: Massey University, 2015. 452 p.

2. Wang L., Cheng L., Zhao G. Machine Learning for Human Motion Analysis. Anhui: IGI Global, 2009. 318 p.

3. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. California: Springer–Verlag, 2009. 746 p.

4. Artificial Intelligence: A Modern Approach.

URL: <https://towardsdatascience.com/understanding-the-bias-variance-tradeoff> (дата звернення: 20.12.2022).

5. Opitz D., Maclin R. Popular ensemble methods: An empirical study: journal of Artificial Intelligence Research No. 11. El Segundo, 1999. P. 169–198.

6. Ensemble Methods to Optimize Machine Learning Models.

URL: <https://hub.packtpub.com/ensemble-methods-optimize-machine-learning-models> (дата звернення: 20.12.2022).

7. Barmak O. V., Krak Yu. V., Manziuk E. A. Kharakterystyka dlia vyboru modelei u ansambli klasyfikatoriv: naukovyi zhurnal “Problemy prohramuvannia”. Kyiv, 2018. S. 171–179.

8. Understanding the Bias–Variance Tradeoff

URL: <http://scott.fortmannroe.com/docs/BiasVariance.html> (дата звернення: 20.12.2022).

9. Dietterich T., Ensemble Methods in Machine Learning.

URL: <http://web.engr.oregonstate.edu/~tgd/publications/mcs-ensembles.pdf> (дата звернення: 25.12.2022).

10. Ensemble methods: bagging, boosting and stacking. URL: <https://towardsdatascience.com/ensemble-methods-bagging-boosting-and-stacking-c9214a10a205> (дата звернення: 27.12.2022).

11. Moretti F., Pizzuti S., Panzieri S., Annunziato M., Urban traffic flow forecasting through statistical and neural network bagging ensemble hybrid modeling, *Neurocomputing* (2015).

12. Kim M.J., Kang D.K., Kim H.B. Geometric mean based boosting algorithm with over-sampling to resolve data imbalance problem for bankruptcy prediction, *Expert Syst. Appl.* 42 (3) (2015) 1074–1082.

13. Kang S., Cho S., Kang P. Multi-class classification via heterogeneous ensemble of one-class classifiers, *Eng. Appl. Artif. Intell.* 43 (2015) 35–43.

14. Bustinh i behhinh yak metody formuvannia ansamblei modelei / Verbivskyi D. S., Karpliuk, S. O., Fonariuk, O. V., Sikora, Ya. B. Zhytomyr: ZhDU im. Ivana Fran-ka, 2021. S. 163-169.

15. Zhi-Hua Zhou Ensemble Learning. URL: <https://cs.nju.edu.cn/zhoush/zhoush.files/publication/springerEBR09.pdf> (дата звернення: 20.12.2022).

16. Shah B.R., Lipscombe L.L. Clinical diabetes research using data mining: a Canadian perspective, *Can. J. Diabetes* 39 (3) (2015) 235–238.

17. Improvements on Cross-Validation: The 632+ Bootstrap Method. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1997.10474007#.U2o7MVdMzTo> (дата звернення: 22.12.2022).

18. Ahmad A., Brown G. Random ordinality ensembles: ensemble methods for multi-valued categorical data, *Inf. Sci.* 296 (2015) 75–94.

19. Sluban B., Lavrac N. Relating ensemble diversity and performance: a study in class noise detection, *Neurocomputing* 160 (2015) 120–131.

20. Bashir S., Qamar U., Khan F.H. IntelliHealth: A medical decision support application using a novel weighted multi-layer classifier ensemble framework. *Journal of Biomedical Informatics*. – 2016. – vol.59. – pp.185- 200.

21. E-Commerce Shipping DataSet.

URL: <https://www.kaggle.com/datasets/+prachi13/customer-analytics> (дата звернення: 15.11.2022)

22. Kalinina I.O., Hozhyi O.P. Doslidzhennia efektyvnosti metodiv klasyfikatsii pry prohnuzuvanni v zadachakh mashynnoho navchannia. Upravlinnia rozvytkom skladnykh system. Kyiv, 2021. № 46. S. 173 – 180, dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2021.46.173-180.
23. Maniruzzaman M., Rahman MJ., Ahammed B. Classification and prediction of diabetes disease using machine learning paradigm. Health information science and systems, Vol. 8. Texas, 2020. P. 1–14.
24. Bidiuk P.I., Kuznietsova N.V., Terentiev O.M. Systema pidtrymky pryiniattia rishen dlia analizu danykh. Kyiv: Naukovi visti NTUU «KPI», 2011. S. 48–61.
25. Zhan Zh. Introduction to machine learning: k-nearest neighbors. Vienna: Ann Transl Med, 2016. 218 p.
26. Metryky v zadachakh mashynnoho navchannia.
URL: <https://habr.com/ru/company/ods/blog/328372> (data zvernennia: 20.12.2022).

Received 05.04.2023.

Accepted 07.04.2023.

Intelligent classification system based on ensemble methods

In the paper, based on machine learning methods, the solution of the classification task was investigated using a two-level structure of ensembles of models. To improve forecasting results, an ensemble approach was used: several basic models were trained to solve the same problem, with subsequent aggregation and improvement of the obtained results. The problem of classification was studied. The architecture of the intelligent classification system is proposed. The system consists of the following components: a subsystem of preprocessing and data analysis, a subsystem of data distribution, a subsystem of building basic models, a subsystem of building and evaluating ensembles of models. A two-level ensemble structure was used to find a compromise between bias and variance inherent in machine learning models. At the first level, an ensemble based on stacking is implemented using a logistic regression model as a metamodel. The predictions that are generated by the underlying models are used as input for training in the first layer. The following basic models of the first layer were chosen: decision trees (DecisionTree), naive Bayesian classifier (NB), quadratic discriminant analysis (QDA), logistic regression (LR), support vector method (SVM), random forest model (RF). The bagging method based on the Bagged CART algorithm was used in the second layer. The algorithm creates N regression trees using M initial training sets and averages the resulting predictions. As the basic models of the second layer, the following were chosen: the first-level model (Stacking LR), the model of artificial neural networks (ANN); the linear discriminant analysis (LDA) model and the nearest neighbor (KNN) model. A study of basic classification mod-

els and ensemble models based on stacking and bagging, as well as metrics for evaluating the effectiveness of the use of basic classifiers and models of the first and second level, was conducted. The following parameters were determined for all the methods in the work: prediction accuracy and error rate, Kappa statistic, sensitivity and specificity, accuracy and completeness, F-measure and area under the ROC curve. The advantages and effectiveness of the ensemble of models in comparison with each basic model are determined.

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

Жебко Олександр Олегович – аспірант, Миколаївський Національний аграрний університет.

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

Ганніченко Тетяна Анатоліївна – доцент кафедри іноземних мов Миколаївського Національного аграрного університету, к.п.н., доцент.

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

Zhebko Oleksandr Olegovych - PhD student, Mykolaiv National Agrarian University.

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.

Hannichenko Tetyana Anatoliivna - associate professor of the Department of Foreign Languages of the Mykolaiv National Agrarian University, PhD, associate professor.

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

ОЦІНКА РАЦІОНАЛЬНІЙ НОМЕНКЛАТУРИ КОНТРОЛЮЄМИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТІВ ПРИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННІ, СПОСТЕРЕЖЕННІ ТА УПРАВЛІННІ

Анотація. Номенклатура контролюємих параметрів і норм точності вимірювань визначає достовірність контролю і його трудоємність. В середньому трудоємність контролю складає близько 10% загальної трудоємності виготовлення об'єктів, а у ряді галузей – значно вище (авіаційно-космічна техніка). Найпростішою задачею при визначенні раціональній номенклатури контролюємих параметрів об'єктів являється виключення надмірних параметрів, при цьому потрібно визначити ймовірність того, що відхилення якогось параметра X_2 у межах заданих допусків лежать так, як і відхилення параметра X_1 у межах його заданих допусків. При цьому визначені нерівності, якими визначається найменше значення цієї ймовірності. Загальним принципом розв'язку цієї задачі є визначення умовних ймовірностей (якщо розглядається два параметри) P_{11}, P_{12} , або P_{21}, P_{22} . При цьому, якщо отримані значення: P_{11}, P_{12} ймовірностей більше (або рівні) допустимому значенню $P_{доп}$, то доцільно здійснювати контроль тільки параметра X_1 , а X_2 виключити із номенклатури параметрів. Якщо: P_{21}, P_{22} - більше (або рівні) допустимому значенню $P_{доп}$, то виключається X_1 . Наведено приклад виключення надлишкового параметра контролю. Метод можна узагальнити для будь-якого числа параметрів, для чого треба скористатися кореляційними матрицями або простим перебором комбінацій параметрів. Розроблена програма для ЕОМ, якою можна скористуватися при наявності такої інформації: 1) кількість контрольованих параметрів (n); 2) значення допусків ($X_{ні}$, $X_{ві}$), на які підлягають контролю параметри; 3) числові характеристики розподілів значень параметрів в межах заданих допусків – середнє значення \bar{X}_i і середнє квадратичне відхилення σ_{xi} ; 4) види законів розподілу значень параметрів; 5) данні кореляційних зав'язків між параметрами і значеннями попарних коефіцієнтів кореляції (r_{ij}); 6) значення ймовірностей помилок контролю P_{12}, P_{21} (при двох параметрах). По мірі накопичення статистичних даних розрахунки треба коректувати.

Ключові слова: параметри контролю, раціональна номенклатура, надлишковість параметрів, закони розподілу, кореляція.

© 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 визначення раціональної номенклатури контролюємих параметрів об'єктів при їх виготовленні, спостереженні, управлінні та програмно реалізувати процедуру розрахунків раціональної номенклатури параметрів об'єктів різної природи, що контролюються, і узагальнити методику на (n) параметрів.

Викладення основного матеріалу. Номенклатура вимірювальних параметрів і норм точності вимірювань визначає два найважливіших показники; достовірність контролю і його трудоемність. Нерідко розробники і технологи намагаються йти по шляху максимального контролю режимів технологічного процесу устаткування і інструменту, не беручи до уваги трудоемність вимірювальних процесів, а цей чинник достатньо істотний. В середньому трудоемність контрольно-вимірювальних операцій складає близько 10% загальної трудоемності виготовлення виробів, а у ряді галузей — значно вище.

При проведенні метрологічної експертизи необхідно ретельно проаналізувати номенклатуру вимірювальних параметрів, встановити можливі кореляційні зв'язки між ними, а також визначити параметри, які можна не вимірювати (або обмежитися їх індикацією, або взагалі не контролювати). Деякі загальні рекомендації за оцінкою раціональності номенклатури контрольованих параметрів будуть приведені нижче.

Для встановлення раціональної номенклатури параметрів, що підлягають контролю при виготовленні і експлуатації виробів, конструктору (розробнику виробів), технологу (розробнику технологічних процесів їх виготовлення), або експерту (оцінюючому раціональність вибраної номенклатури) в загальному випадку необхідно мати в своєму розпорядженні наступну інформацію:

- 1) значення допусків ($X_{нi}$, $X_{вi}$) на належні контролю параметри (X_i);
- 2) числові характеристики розподілів значень параметрів в межах заданих допусків, при серійному виготовленні виробів - середніми значеннями \bar{X}_i і середніми квадратичними відхиленнями σ_{xi} ;
- 3) видами законів розподілу значень параметрів;
- 4) дані про наявність кореляційних зв'язків між параметрами і значеннями попарних коефіцієнтів кореляції;
- 5) допустимі значення ймовірності помилок контролю, ($P_{ид}$).

Зазвичай, на стадії проектування виробів конструктор-розробник не має в своєму розпорядженні такої вичерпної інформації, зокрема він не має в своєму розпорядженні даних про види і характеристики законів розподілу значень параметрів, які залежать від технології виготовлення виробів, і, лише, маючи па-

раметричну модель виробу, може приблизно судити про ступінь корельованості тих або інших його параметрів. Тому на цій стадії можливо здійснити лише наближені розрахунки (зробивши ряд спрощуючих допущень), які у міру накопичення статистичних даних можуть бути уточнені в процесі експертизи конструкторсько-технологічної документації.

Найпростіша реальна задача, рішення якої необхідне для раціонального вибору номенклатури контрольованих параметрів, виключення надмірних параметрів при розробці і експертизі нормативних документів, полягає в наступному. потрібно визначити ймовірність того, що якщо виміряне в процесі контролю виробу відхилення параметра $X_1(X_2)$ лежить у межах заданих допусків, то і значення параметра $X_2(X_1)$ також лежить в межах заданих для нього допусків.

Події, відповідні найменшому значенню цієї ймовірності визначаються нерівностями:

$$X_{H2}(X_{H1} \leq X_2(X_1) \leq X_{B2}(X_{B1})/X_1(X_2)=X_{H1}(X_{H2}), \quad (1)$$

$$X_{H2}(X_{H1}) \leq X_2(X_1) \leq X_{B2}(X_{B1})/X_1(X_2)=X_{B1}(X_{B2}), \quad (2)$$

що означає: відхилення параметра X_2 (або X_1) знаходиться в межах заданих допусків X_{H2} (або X_{H1}), X_{B2} (або X_{B1}). коли (за умови, що) виміряне відхилення іншого параметра X_1 (або X_2) лежить на нижній (1) або верхній (2) межах допусків.

Загальним принципом розв'язку вказаної задачі є визначення умовної ймовірності

$$P_{11}(X_{H2} \leq X_2 \leq X_{B2}/X_1); P_{12}(X_{H2} \leq X_2 \leq X_{B2}/X_1=X_{B1}); \quad (3)$$

$$P_{21}(X_{H1} \leq X_1 \leq X_{B1}/X_2); P_{22}(X_{H1} \leq X_1 \leq X_{B1}/X_2=X_{B2}). \quad (4)$$

Якщо отримані значення ймовірності P_{11} і P_{12} більше (або рівні) допустимому значенню P_d , то доцільно здійснювати контроль лише параметра X_1 не контролюючи параметр X_2 , тобто параметр X_2 із раціоналізованої номенклатури, виключається. Якщо P_{21} і P_{22} більше або рівне P_d , то виключається X_1 . Значення P_d може бути прийнято рівним $P_d=1-P_2$, де P_2 - ймовірність помилки контролю другого роду, яка залежить від прийнятих методу і засобів контролю виключаємого параметра.

Ймовірність помилки контролю першого роду виключеного параметра при цьому можна не враховувати, оскільки при виході значень залишеного контрольованого параметра за межі допусків, виріб вже буде забраковано.

Припустимо, що сумісний розподіл значень X_1 , X_2 підкоряється нормальному закону розподілу з густиною:

$$\varphi(X_1, X_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_{X_1}\sigma_{X_2}\sqrt{1-r_{12}^2}} \cdot EXP \left\{ -\frac{1}{2(1-r_{12}^2)} \cdot \left[\frac{(X_1 - \bar{X}_1)^2}{\sigma_{X_1}^2} - \frac{2r_{12}(X_1 - \bar{X}_1)(X_2 - \bar{X}_2)}{\sigma_{X_1} \cdot \sigma_{X_2}} + \frac{(X_2 - \bar{X}_2)^2}{\sigma_{X_2}^2} \right] \right\}$$

Тоді умовні розподілення значень X_1, X_2 :

$$\varphi(X_2 / X_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{X_2} \cdot \sqrt{1-r_{12}^2}} \cdot EXP \left\{ -\frac{1}{2(1-r_{12}^2)} \cdot \left[\frac{(X_2 - \bar{X}_2) - r_{12}(X_1 - \bar{X}_1)}{\sigma_{X_2}} \right]^2 \right\}, \quad (5)$$

$$\varphi(X_1 / X_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{X_1} \cdot \sqrt{1-r_{12}^2}} \cdot EXP \left\{ -\frac{1}{2(1-r_{12}^2)} \cdot \left[\frac{(X_1 - \bar{X}_1) - r_{12}(X_2 - \bar{X}_2)}{\sigma_{X_1}} \right]^2 \right\}, \quad (6)$$

Отже в даному випадку для аналізу надмірності номенклатури контрольованих параметрів необхідно оцінити наступні умови ймовірності: при $r_{12} > 0$ (позитивна кореляція):

$$P_{11}^+(X_{H_2} \leq X_2 / X_1 = X_{H_1}) = 1 - \int_{-\infty}^{X_{H_2}} \varphi_1(X_2 / X_1) dX_2 = 1 - \Phi \left(\frac{X_{H_2} - \bar{X}_2 - r_{12} \cdot \sigma_{X_2} / \sigma_{X_1} \cdot (X_{H_1} - \bar{X}_1)}{\sigma_{X_2} \sqrt{1-r_{12}^2}} \right) \quad (7)$$

Другу границю ($X_2 = X_{B_2}$) опускаємо, оскільки ймовірність нерівності $X_2 > X_{B_2}$ при $X_1 = X_{H_1}$ і позитивному коефіцієнті кореляції дуже мала;

$$P_{12}^+(X_2 \leq X_{B_2} / X_1 = X_{B_1}) = 1 - \int_{X_{B_2}}^{\infty} \varphi_1(X_2 / X_{H_1}) dX_2 = 1 - \Phi \left(\frac{\bar{X}_2 - X_{B_2} + r_{12} \cdot \sigma_{X_2} / \sigma_{X_1} \cdot (X_{H_1} - \bar{X}_1)}{\sigma_{X_2} \sqrt{1-r_{12}^2}} \right) \quad (8)$$

$$P_{21}^+(X_{H_1} \leq X_1 / X_2 = X_{H_2}) = 1 - \int_{-\infty}^{X_{H_1}} \varphi_2(X_1 / X_{H_2}) dX_1 = 1 - \Phi \left(\frac{X_{H_1} - \bar{X}_1 - r_{12} \cdot \sigma_{X_1} / \sigma_{X_2} \cdot (X_{H_2} - \bar{X}_2)}{\sigma_{X_1} \sqrt{1-r_{12}^2}} \right) \quad (9)$$

$$P_{22}^+(X_1 \leq X_{B_1} / X_2 = X_{B_2}) = 1 - \int_{X_{B_1}}^{\infty} \varphi_2(X_1 / X_{B_2}) dX_1 = 1 - \Phi \left(\frac{\bar{X}_1 - X_{B_1} + r_{12} \cdot \sigma_{X_1} / \sigma_{X_2} \cdot (X_{B_2} - \bar{X}_2)}{\sigma_{X_1} \sqrt{1-r_{12}^2}} \right) \quad (10)$$

При $r_{12} < 0$ (негативна кореляція):

$$P_{11}^-(X_{H_2} \leq X_2 / X_1 = X_{B_1}) = 1 - \Phi \left(\frac{X_{H_2} - \bar{X}_2 - r_{12} \cdot \sigma_{X_2} / \sigma_{X_1} \cdot (X_{B_1} - \bar{X}_1)}{\sigma_{X_2} \sqrt{1-r_{12}^2}} \right), \quad (11)$$

$$P_{12}^-(X_2 \leq X_{B_2} / X_1 = X_{H_1}) = 1 - \Phi \left(\frac{\bar{X}_2 - X_{B_2} + r_{12} \cdot \sigma_{X_2} / \sigma_{X_1} \cdot (X_{H_1} - \bar{X}_1)}{\sigma_{X_2} \sqrt{1-r_{12}^2}} \right), \quad (12)$$

$$P_{21}^-(X_{H_1} \leq X_1 / X_2 = X_{B_2}) = 1 - \Phi \left(\frac{X_{H_1} - \bar{X}_1 - r_{12} \cdot \sigma_{X_1} / \sigma_{X_2} \cdot (X_{B_2} - \bar{X}_2)}{\sigma_{X_1} \sqrt{1 - r_{12}^2}} \right), \quad (13)$$

$$P_{22}^-(X_1 \leq X_{B_1} / X_2 = X_{H_1}) = 1 - \Phi \left(\frac{\bar{X}_1 - X_{B_1} + r_{12} \cdot \sigma_{X_1} / \sigma_{X_2} \cdot (X_{H_1} - \bar{X}_2)}{\sigma_{X_1} \sqrt{1 - r_{12}^2}} \right), \quad (14)$$

де $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ - нормалізована функція Лапласа

Кожна з цих ймовірностей порівнюється з P_d . Якщо P_{11}^+ (P_{11}^-) та P_{12}^+ (P_{12}^-) більше P_d , то параметр X_1 є збитковим (так як з ймовірністю, більшою P_d , виріб буде правильно признано придатним по цьому параметру X_1) і з раціональної номенклатури виключається; якщо та P_{22}^+ (P_{22}^-) більше P_d то збитковим являється параметр X_2 .

В ряді випадків може виявитися, що всі ймовірності P_{11} , P_{12} , P_{21} , P_{22} більші P_d . Тоді питання про виключення того або іншого параметра з числа контрольованих розв'язується, виходячи з техніко-економічних міркувань. Наприклад, шляхом зіставлення складності або вартості процесів контролю. одержані наступні дані у вигляді табл. 1.

Таблиця 1

Результати процесу контролю

ΔX_1	0.91	-0.14	0.89	0.72	-0.64	0.94	-0.92	1.04	-0.31	-0.21
ΔX_2	-0.42	0.11	0.34	0.36	-0.28	0.52	-0.39	0.26	0.13	-0.29
ΔX_1	0.48	0.52	-0.74	-0.82	0.31	0.71	-0.18	-0.48	0.91	0.74
ΔX_2	0.31	0.31	-0.26	-0.38	-0.14	0.44	0.26	0.18	0.41	0.31
ΔX_1	0.32	0.64	-0.48	-0.44	0.79	0.52	0.55	0.68	-0.67	-0.32
ΔX_1	0.16	0.20	-0.56	-0.19	0.38	0.25	0.25	0.20	0.11	-0.18

Обробка представлених даних дає наступні результати:

$$\Delta X_1 = 0,17 \text{ мм} \quad \tilde{\sigma}_{\Delta X_1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} (\Delta X_{1i} - \Delta X_1)^2}{29}} = 0,63 \text{ мм}$$

$$\Delta X_2 = 0,17 \text{ мм} \quad \tilde{\sigma}_{\Delta X_2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} (\Delta X_{2i} - \Delta X_2)^2}{29}} = 0,30 \text{ мм}$$

$$\bar{r}_{12}^2 = \frac{1}{30 \sigma_{\Delta X_1} \sigma_{\Delta X_2}} = \sum_{i=1}^{30} (\Delta X_{1i} - \Delta X_1)(\Delta X_{2i} - \Delta X_2) = 0,66.$$

Розрахунок по формулах (8)...(10) при заданих допустимих відхиленнях $\Delta X_{1д} = \pm 1 \text{ мм}$, $\Delta X_{2д} = \pm 0,5 \text{ мм}$:

$$P_{11}^+ = 0,9014 \quad P_{12}^+ = 0,7690$$

$$P_{21}^+ = 0,66090 \quad P_{22}^+ = 0,7014$$

В даному випадку при допускаємій ймовірності помилки контролю другого роду $P_2 \leq 25\%$ параметр X_2 (циліндричність трубки) є надлишковим та з раціоналізованої номенклатури контрольованих параметрів його слід виключити.

Розглянутий метод можна узагальнити на будь-які форми завдання допусків (наприклад, для односторонніх допусків), для великого числа параметрів, для цього можливо скористатися або кореляційними матрицями, або простим перебором комбінацій параметрів.

Опис моделі. Рішення реального завдання раціонального вибору номенклатури контрольованих параметрів, виключення надлишкових параметрів при розробці та експертизі нормативних документів полягає в наступному. Потрібно визначити ймовірність того, що, якщо виміряне у процесі контролю виробу відхилення параметра X_1 (X_2) лежить в межах заданих допусків, то і значення параметра X_2 (X_1) також лежить у межах заданих для нього допусків. Події, що відповідають найменшому значенню цієї ймовірності, визначаються нерівностями:

$$X_{H2}(X_{H1}) \leq X_2(X_1) \leq X_{B2}(X_{B1}) / X_1(X_2) = X_{H1}(X_{H2}), \quad (15)$$

$$X_{H2}(X_{H1}) \leq X_2(X_1) \leq X_{B2}(X_{B1}) / X_1(X_2) = X_{B1}(X_{H2}), \quad (16)$$

що означає наступне. Відхилення параметра X_2 (X_1) знаходиться в межах заданих допусків $X_{H2}(X_{H1})$, $X_{B2}(X_{B1})$, коли (за умови, що) навмисне відхилення іншого параметра X_1 (або X_2) лежить на нижній (15) або верхній (16) межах допусків.

Загальним принципом вирішення задачі є певна умова ймовірностей:

$$P_{11} (X_{H2} \leq X_2 \leq X_{B2} / X_1 = X_{H1}), \quad (17)$$

$$P_{12} (X_{H2} \leq X_2 \leq X_{B2} / X_1 = X_{B1}), \quad (18)$$

$$P_{21} (X_{H1} \leq X_1 \leq X_{B1} / X_2 = X_{H2}), \quad (19)$$

$$P_{22}(X_{H1} \leq X_1 \leq X_{B1} / X_2 = X_{B2}), \quad (20)$$

При цьому, якщо отримані значення ймовірностей P_{11} , P_{12} більше (або рівні) допускаемому значенню P_d , то доцільно здійснити контроль лише параметра X_1 , не контролюючи параметр X_2 , так як параметр X_2 з раціональної номенклатури виключається. Якщо P_{21} і P_{22} більше або дорівнюють P_d , то виключається X_1 . Причому значення P_d може бути прийнято $P_d = 1 - P_2$, де P_2 - ймовірність помилки контролю другого роду, що залежить від прийнятих методів і засобів контролю виключаємого параметра. При цьому, ймовірність помилки контролю першого роду виключаємого параметра можна не враховувати, тому що при виході значень параметра, що залишився, за границі допусків виріб уже буде забраковано. Для аналізу надмірності номенклатури контрольованих параметрів при нормальному законі розподілу значень X_1 і X_2 необхідно оцінити наступні умовні ймовірності: при $r_{12} \geq 0$ (позитивна кореляція

$$P_{11}^+(X_{H2} \leq X_2 / X_1 = X_{H1}), \quad (21)$$

При цьому другу межу (тут $X_2 \leq X_{B1}$) опускаємо, оскільки ймовірність нерівності $X_2 > X_{B2}$ при $X_1 = X_{H1}$ і позитивному коефіцієнті кореляції дуже мала.

$$P_{12}^+(X_2 \leq X_{B2} / X_1 = X_{B1}), \quad (22)$$

$$P_{21}^+(X_{H1} \leq X_1 / X_2 = X_{H2}), \quad (23)$$

$$P_{22}^+(X_1 \leq X_{B1} / X_2 = X_{B2}), \quad (24)$$

При $r_{12} < 0$ (негативна кореляція):

$$P_{11}^-(X_{H2} \leq X_2 / X_1 = X_{B1}), \quad (25)$$

$$P_{12}^-(X_2 \leq X_{B2} / X_1 = X_{H1}), \quad (26)$$

$$P_{21}^-(X_{H1} \leq X_1 / X_2 = X_{B2}), \quad (27)$$

$$P_{22}^-(X_1 \leq X_{B1} / X_2 = X_{H2}), \quad (28)$$

кожна з цих ймовірностей порівнюється з P_d . Якщо і $P_{11}^+(P_{11}^-)$ і $P_{12}^+(P_{12}^-)$ більше P_d , то параметр X_2 є надлишковим і із раціональної номенклатури виключається. Якщо $P_{21}^+(P_{21}^-)$, $P_{22}^+(P_{22}^-)$ більше P_d , то надлишковим є параметр X_1 . У ряді випадків, може виявитися, що всі ймовірності: P_{11} , P_{12} , P_{21} , P_{22} більше P_d . Тоді питання про виключення того чи іншого параметра з числа контрольованих вирішується, виходячи з техніко-економічних міркувань, наприклад, шляхом зіставлення складності або вартості процесів контролю.

В даній роботі приведені загальні принципи встановлення раціональної номенклатури контрольованих параметрів.

Розроблена модель та програмно реалізована процедура визначення раціональної номенклатури контрольованих параметрів об'єктів. Проведені дослі-

дження показали, що при організації контрольно-вимірювальних операцій контролю якості, оптимізація кількості контрольованих параметрів являється актуальною задачею. Модель можна узагальнити на будь-які форми завдання допусків (наприклад для односторонніх допусків, для цього застосовують кореляційні матриці, або перебір комбінацій параметрів.

Розроблена програма для ЕОМ може бути корисна конструктору, технологу або експерту, який оцінює раціональність обраної номенклатури параметрів контролю.

Висновки.

1. Приведено модель і методика виключення надлишкового параметру контролю деякого об'єкту, які можуть бути узагальнені для будь-якого числа параметрів контролю об'єкту, для чого треба скористатися кореляційними матрицями і визначенням умовних ймовірностей.

2. Розроблена програма для ЕОМ, котрою можна скористатися при наявності визначеної інформації, яка накопичується з часом і дозволяє коректувати розрахунки.

3. Програма виключення надлишкового параметру контролю деякого об'єкту була перевірена на прикладі контролю осцилографа С1-65 (у статті не приводиться).

ЛІТЕРАТУРА

1. Бідюк П.І., Гожий О.П. Імовірісно-статистичні методи моделювання і прогнозування: Монографія. – Миколаїв: Чорноморський державний університет імені Петра Могили, 2014. – 440 с.
2. Піндус Н.М. Вимірювальний експеримент та обробка результатів. – Івано-Франковськ: Факел, 2010. – 248 с.
3. EURACHEM/CITAC Guide, Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement, Second Edition. Laboratory of the Government Chemist, London (2000). ISBN 0-948926-15-5.
4. EURACHEM/CITAC Guide, Measurement uncertainty arising from sampling: A guide to methods and approaches. EURACHEM, (2007). Available from <http://www.eurachem.org>.
5. ISO 21748:2010. Guide to the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation. ISO, Geneva (2010).
6. 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).

7. Бондаренко С.Г. Основи технології машинобудування: навчальний посібник. - Львів: Магнолія, 2007. – 500 с.
8. Робочі процеси високих технологій у машинобудуванні: підручник/ А.І. Грабченко, М.В. Вerezub/за ред. А.І.Грабченко. – Житомир: ЖДГУ, 2011. – 507 с.

REFERENCES

1. Bidyuk P.I., Gozhiy O.P. Imovirnistno-statistical methods of modeling and forecasting: Monograph. - Mykolaiv: Chornomorsky State University named after Peter Mogila, 2014. - 440 p.
2. Pindus N.M. Vimiruválny experiment and review of results. - Ivano-Frankivsk: Fakel, 2010. - 248 p.
3. EURACHEM/CITAC Guide, Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement, Second Edition. Laboratory of the Government Chemist, London (2000). ISBN 0-948926-15-5.
4. EURACHEM/CITAC Guide, Measurement uncertainty arising from sampling: A guide to methods and approaches. EURACHEM, (2007). Available from <http://www.eurachem.org>.
5. ISO 21748:2010. Guide to the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation. ISO, Geneva (2010).
6. 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).
7. Bondarenko S.G. Fundamentals of machine-building technology: introductory guide. - Lviv: Magnolia, 2007. – 500 s.
8. Work processes of high technologies in mechanical engineering: textbook/ A.I. Hrabchenko, M.V. Verezub/ed. A.I. Grabchenko. - Zhytomyr: ZhDSU, 2011. - 507 p.

Received 04.04.2023.

Accepted 10.04.2023.

Alternative to mean and least squares methods used in processing the results of scientific and technical experiments

The nomenclature of controlled parameters and norms of measurement accuracy determines the reliability of control and its laboriousness. On average, the labor-intensiveness of control is about 10% of the total labor-intensiveness of manufacturing objects, and in a number of industries it is much higher (aerospace engineering). The simplest task in determining a rational nomenclature of controlled parameters of objects is the exclusion of excessive parameters, while it is necessary to determine the probability that the deviations of some X_2 parameter within the specified tolerances are the same as

the deviations of the X_1 parameter within its specified tolerances. At the same time, inequalities are defined that determine the smallest value of this probability. The general principle of solving this problem is the determination of conditional probabilities (if two parameters are considered) $P_{P_{11}, P_{12}}$, or $P_{P_{21}, P_{22}}$. At the same time, if the obtained values: P_{11}, P_{12} , are more likely than (or equal to) the permissible value of R_{dop} , then it is advisable to control only parameter X_1 , and exclude X_2 from the nomenclature of parameters. If: P_{21}, P_{22} , are greater than (or equal to) the permissible value of R_{dop} , then X_1 is turned off. An example of the exclusion of a redundant control parameter is given. The method can be generalized for any number of parameters, for which it is necessary to use correlation matrices or a simple enumeration of parameter combinations. A computer program has been developed that can be used if the following information is available: 1) the number of controlled parameters (n); 2) values of tolerances (X_{ni}, X_{vi}), which parameters are subject to control; 3) numerical characteristics of distributions of parameter values within the specified tolerances - the average value of \bar{X}_i and the average squared deviation σ_{xi} ; 4) types of distribution laws of parameter values; 5) data on correlations between parameters and values of pairwise correlation coefficients (r_{ij}); 6) the value of the probabilities of control errors P_{12}, P_{21} (with two parameters). Calculations should be adjusted as statistical data accumulate.

Key words: control parameters, rational nomenclature, parameter redundancy, distribution laws, correlation.

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 ім.Олеся Гончара.

Лучишин Тарас Романович, кандидат медичних наук, спеціаліст вищої категорії, заступник директора «Української готельної групи».

Алексєєнко Сергій Вікторович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри механотроніки Дніпровського національного університету ім.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.

Ignatkin Valery Ustinovich - 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.

Dudnikov Volodymyr Stepanovych - candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Mechatronics of Oles Honchar Dnipro National University.

Luchyshyn Taras Romanovych - candidate of medical sciences, specialist of the highest category, deputy director of the "Ukrainian Hotel Group".

Alekseenko Serhii Viktorovych - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechatronics, Dnipro National University named after Oles Honchar.

Yushkevich Oleh Pavlovich - candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Mechatronics of Dnipro National University named after Oles Honchar.

Karpova Tetyana Petrivna - senior lecturer of the Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, USUNT.

Khokhlova Tetyana Stanislavivna - 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.

Khomosh Yuriy Stepanovych - candidate of economic sciences, associate professor, director of the Drohobyt'sk Oil and Gas Professional College.

Tikhonov Vasyl Andriyovych - director of the Dnipro Vocational College of Radio Electronics.

В.Ю. Каштан, К.Л. Сергеева, О.В. Коробко, Д.В. Иванов
**ПОШУК ТА ОЦІНКА ОСТРОВІВ ТЕПЛА
НА ЦИФРОВИХ КОСМІЧНИХ ЗНІМКАХ**

Анотація. Останнім часом все більш актуальними стають дослідження теплового забруднення міст, «Міських островів тепла», з використанням космічних знімків. Підвищення теплового фону часто є індикатором інших видів забруднення, тому вивчення його просторової диференціації допомагає оцінити інтенсивність антропогенного впливу на довкілля загалом.

В роботі отримав подальший розвиток метод виділення сталих островів тепла урбанізованих територій за часовими рядами супутникових зображень. Запропоновано методику пошуку та оцінки островів тепла на цифрових космічних знімках, що дозволяє на основі аналізу різночасових карт температури виявляти стабільні у часі ділянки теплового забруднення, потенційно небезпечні для населення прилеглих територій. Виконано побудову карт UHI, LST міста Дніпро з використанням запропонованої методики.

Ключові слова: міський тепловий острів, температура поверхні землі, альbedo, LST, UHI, ДЗЗ, аерокосмічний моніторинг, тепла зйомка

Постановка проблеми. Заміни природного ландшафту штучним середовищем призвели до зміни екосистеми та фізичних властивостей поверхні, таких як теплоакмулююча здатність та властивості теплопровідності [1]. Це ускладнює передачу тепла між міськими районами та довкіллям. Зображення температури поверхні землі (Land Surface Temperature, LST) з різних супутників широко використовуються для дослідження міського теплового середовища. Карти LST забезпечують повне просторове охоплення, що відрізняє їх від точкових даних про температуру повітря, отриманих з метеорологічних станцій. Зважаючи на це, в останні десятиліття зростає науковий інтерес до вивчення проблеми так званих міських островів тепла (Urban Heat Islands, UHI). «Міські острови тепла» виникають, коли міста замінюють природний покрив землі щільними концентраціями тротуарів, будівель та інших поверхонь, які поглинають і утримують тепло. Цей ефект призводить до збільшення витрат на споживання електроенергії (наприклад, на кондиціонування повітря), підвищує-

ся рівень забруднення повітря, а також захворюваність та смертність, пов'язані зі спекою. Так, наприклад, темні поверхні (низьке альbedo) поглинають більше енергії від сонячного світла, ніж поверхні, що відбивають світло (високе альbedo). Поглинена енергія з часом виділяється у вигляді теплової енергії, яку людина може відчувати. Різницю температур між поверхнями з високим і низьким альbedo можна побачити за допомогою інфрачервоної камери.

Пошук і аналіз просторового розподілу міських островів тепла є важливим завданням у сучасних дослідженнях навколишнього середовища. Це дозволить використовувати ефективні методи боротьби і запобігання негативному впливу теплових аномалій.

Аналіз останніх досліджень. Останнім часом супутникові зображення почали широко використовуватись для вивчення «Міських островів тепла». Розроблено різноманітні алгоритми для оцінки температури земної поверхні, наприклад, mono-window алгоритм, одноканальний метод, алгоритм split-window [2]. Доведено, що міські температури пов'язані з особливостями поверхні, що характеризуються, наприклад, нормалізованим диференціальним вегетаційним індексом (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI). В одному з ранніх досліджень індекс NDVI використаний для оцінки взаємозв'язку між температурою земної поверхні та рослинністю [3]. Пізніше джерела «Міських островів тепла» почали пов'язувати не тільки з термодинамічними властивостями поверхонь, а й з їх формами та геометрією [4].

Дослідження «Міських островів тепла» проводяться по всьому світу [5–8]. В Україні це питання розглядають науковці Б.С. Бусигін, І.М. Гаркуша, Б.В. Шилін, Є.А. Балдін, М.Ю. Грищенко, В.І. Лялько, А.Б. Крилов, В.І. Зацерковний, Н.В. Оберемок, П.О. Березіна та ін. Роботи авторів присвячені основним результатам використання технології створення цифрових карт розподілу температурного поля міста Дніпро (Україна) за даними мультиспектральних сканерів Landsat TM/ETM+ та Terra MODIS. Отримано результати порівняння розподілу температур, одержаних різними методами [9–11].

Метою даної роботи є розробка методики для аналізу температурних аномалій та виявлення «Міських островів тепла» на цифрових космічних знімках у тепловому інфрачервоному діапазоні з супутника Landsat 8.

Виклад основного матеріалу. Моніторинг теплового стану міст базується на використанні різночасових зйомок у інфрачервоному (тепловому) діапазоні електромагнітного спектру. Засобом аналізу, інтерпретації та візуалізації

результатів є новітні інформаційні (у тому числі геоінформаційні) та комунікаційні технології, що дозволяють здійснювати складну схему обробки матеріалів – від створення геопорталів і баз даних до представлення й візуалізації результатів у вигляді двомірних і тримірних просторових моделей розподілу температур і кількісної оцінки теплових втрат об’єктів інфраструктури (промислових підприємств, житлових масивів, інженерних мереж).

На рисунку 1 представлена схема запропонованої в роботі методики аналізу температурних аномалій та виявлення «Міських островів тепла» на цифрових космічних знімках.

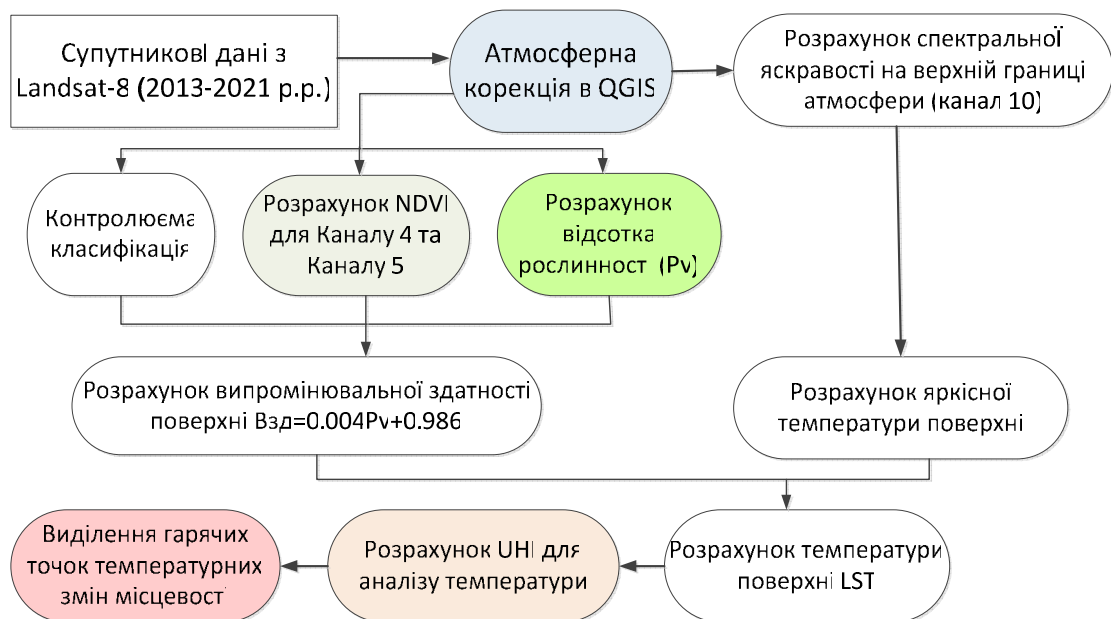


Рисунок 1 – Загальна схема методики

Реалізація методики наступна:

1. Спочатку завантажуюмо набір даних Landsat 8 в програмне середовище QGIS [12].

2. На другому етапі пропонуємо виконати атмосферну корекцію даних Landsat 8 на основі розрахунку коефіцієнту відбиття. Коефіцієнт відбиття – це відношення загального випромінювання, відбитого від поверхні, до загального вхідного випромінювання [13]:

$$P_{\lambda} = \frac{(Lsat_{rat} - Lhaze1\%)TT \cdot d^2}{E_{o\lambda} \cdot \cos\theta_s \cdot TAU_v \cdot TAU_z} \quad , \quad (1)$$

де $Lsat$ – це спектральне випромінювання для кожного каналу; $Lhaze$ - атмосферне спектральне випромінювання, розсіяне в напрямку датчика; TT – атмосферне пропускання світла від поверхні землі до датчика; TAU_v – 1,0 для

Landsat; $\tau_{\text{AUz}} = \cos\theta_s$; $E_0\lambda$ – сонячне спектральне випромінювання поверхні, перпендикулярної до сонячних променів поза атмосферою.

3. Наступним етапом є розрахунок параметрів відбивної здатності та спектральної яскравості земної поверхні. Існуючі дослідження відзначають досить високу збіжність отриманих температурних даних для методів розрахунку випромінювальної здатності, що базуються на параметрі NDVI або класифікації поверхні [13]. Остаточний вибір методу залежить від розв'язуваної задачі та її масштабу. У цьому дослідженні було обрано метод, заснований на контрольованій напівавтоматичній класифікації, завдяки його простоті, зрозумілості та більш точному контролю результату. Після проведеної атмосферної корекції обчислюється NDVI [14].

Далі обчислюється параметр P_v (Proportion of vegetation), який описує відсоток рослинності [4]:

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^2 \quad (2)$$

Отримуємо випромінювальну здатність поверхні землі (Ground Emissivity, або ми назвали V_z):

$$V_z = 0,04 * P_v + 0,986, \quad (3)$$

$$V_z = 1,0094 + 0,047 * \ln(NDVI) \quad (4)$$

де V_z – випромінювальна здатність.

4. Для розрахунку температури земної поверхні використовуємо метод, запропонований в роботі [14] на основі використання 10 каналу космічного знімку Landsat 8, так як 11 канал значно більше схильний до відблисків, засвітів і похибок датчика. Для обчислення яскравісних температур поверхні використовується наступне рівняння [15]:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda}\right) + 1} - 273,15 \quad (5)$$

де T – яскравісна температура у градусах Цельсія; K_1 , K_2 – калібрувальні константи; L_λ – спектральна яскравість на верхній границі атмосфери.

5. На наступному етапі обчислюємо температуру земної поверхні (LST) [15]:

$$LST = \frac{T}{\left(1 + \left(\lambda + \frac{T}{c2}\right) \cdot \ln(e)\right)} \quad (6)$$

де T – яскравісна температура поверхні; λ – довжина хвилі; $c_2 = h \cdot c / s$; h – постійна Планка; c – постійна Больцмана; s – швидкість світла.

Далі починаємо процес пошуку ділянок підвищених температур. Дані космічної зйомки використовуються на різних рівнях моделювання або як вхідні параметри для характеристики різних поверхневих покривів або в асиміляційних процедурах, які спрямовані на отримання адекватних параметрів для обчислення LST. Таким чином, використання УНІ дозволяє виділити ділянки поверхні, на яких спостерігаються високі температури:

$$LST > \mu + 0.5 \cdot \delta, \quad (7)$$

де μ – просторове середнє арифметичне значення від LST; δ – стандартне відхилення LST.

В результаті виконаної операції (7) отримуємо растрове зображення, що показує температуру поверхні землі.

За підсумками цього етапу роботи була формалізована методика розрахунку температур земної поверхні за космічними знімками та створена модель для обробки всіх наборів даних за допомогою модулів `r.mapcalc` та `Graphical Modeler` у `GRASS GIS`. Використано мову `Python` для реалізації запропонованої методики.

Експериментальні результати. Тестування запропонованої в роботі методики проводилось на прикладі території міста Дніпро. На рисунку 2а) наведено результат розрахунку LST за 2021 рік; 2б) – результат виділення УНІ за 2021 рік.

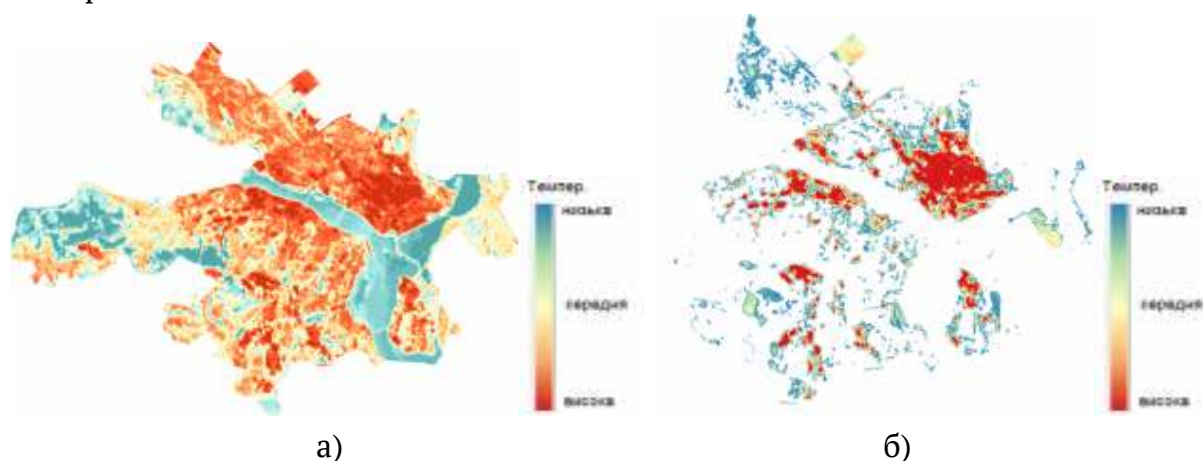


Рисунок 2 – Результат застосування методики пошуку та оцінки островів тепла для території м. Дніпро за 2021 рік: а) LST; б) УНІ

На рисунку 3а наведено результат моніторингу теплових змін з 2013 по 2021 рік. При аналізі карти динаміки теплових островів м. Дніпро легко

помітити, що більша частина території міста потрапляє в зону аномально підвищеної температури порівняно з оточуючими територіями. Крім того, помітно збільшення островів тепла у період 2019-2020 років (рис. 3б) порівняно з 2013-2018 роками в районах приватного сектору, і навпаки зменшення островів тепла у 2021 році (рис. 3б) у промислових зонах. Докладніше розглядаючи період 2013-2015 років видно, що острови тепла розташовані переважно уздовж залізничних колій та в зонах з діючими промисловими підприємствами. Великий вплив має Індустріальний район (НПЗ «Інтерпайп»), проспект Івана Мазепи, вулиці Макарова, Робоча (Південний машинобудівний завод ім. А.М. Макарова, Дніпровський машинобудівний завод), залізна дорога, ТЕЦ. Це сприяє утворенню островів тепла, особливо в спекотні місяці. Варто зазначити, що теплові аномалії також розташовані над деякими сільськогосподарськими територіями на північ від міста через сильний нагрів ріллі. Таким чином, теплова карта дозволяє оцінити залежність утворення островів тепла на території Дніпра. Центр міста більше схильний до теплового забруднення через щільну забудову та велику тепловіддачу від споруд.

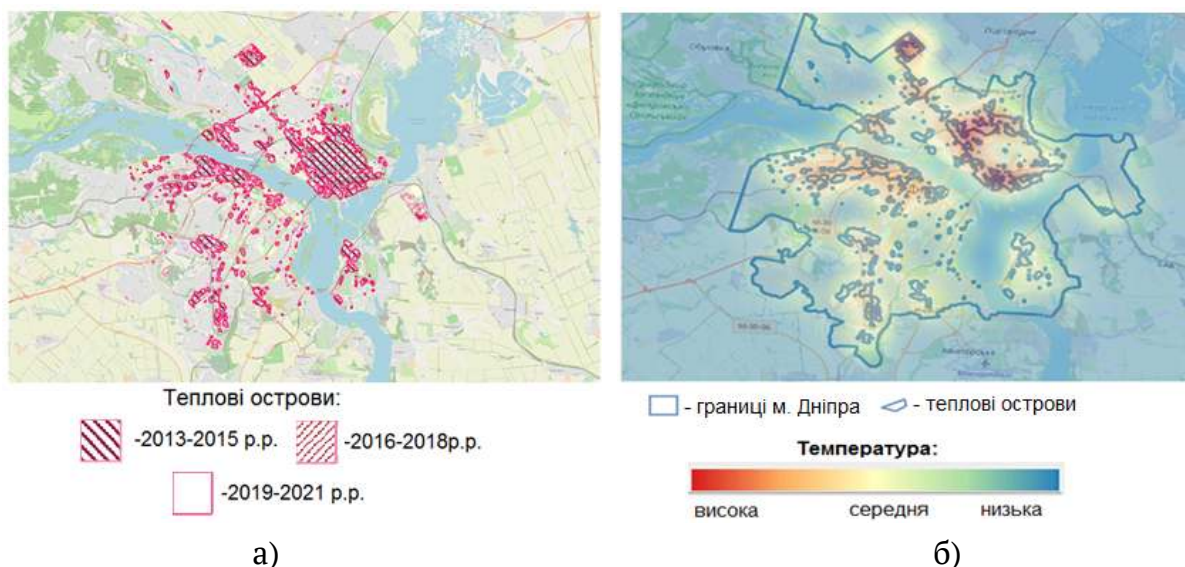


Рисунок 3 – Теплові острови м. Дніпро: а) за період за 2013 – 2021 роки;
б) за період 2019 – 2021 роки

На рисунку 4 наведено гістограму змін температурних показників. Розбиття гістограми яскравіших температур відбувалося за схемою "природні інтервали" (Natural Breaks), у якій границі класів визначаються шляхом угруповання подібних значень і максимально збільшують різницю між класами. У ході виділення вказаних вище щаблів температур границям класів присвоювалися найближчі цілі значення.

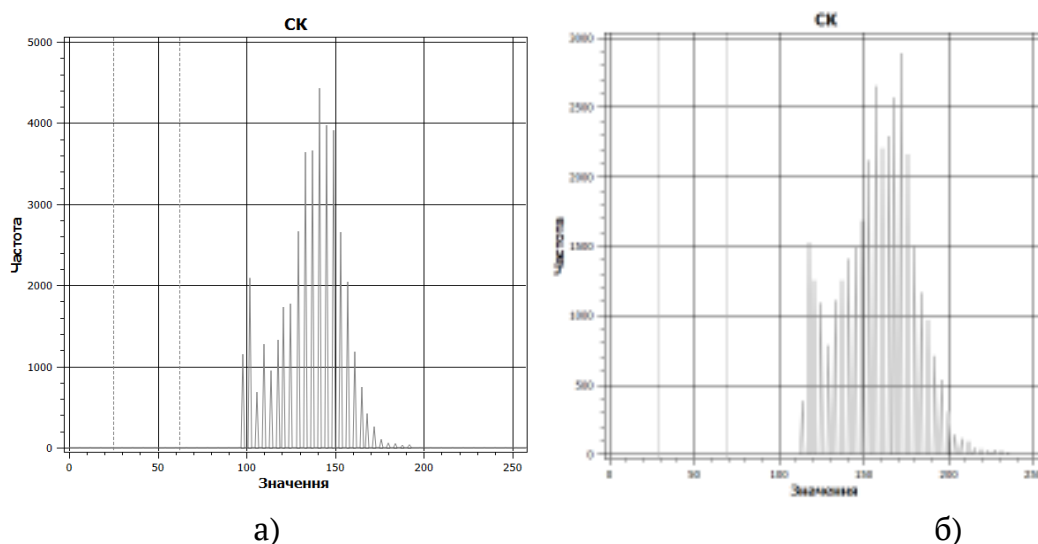


Рисунок 4 – Гістограми яскравісних температур: а) 2013 рік; б) 2021 рік

Висновки. Регулярний супутниковий моніторинг теплового стану урбанізованих геотехнічних систем дозволить своєчасно генерувати аварійні попередження, пов'язані з можливим виникненням УНІ. Проведені дослідження показали, що відбувається підвищення температури на ділянках, де рослинний покрив змінюється на непроникні поверхні і, як наслідок, збільшується середнє альбедо. Альбедо залежить від властивостей поверхні землі, причому вкрита рослинністю поверхня має нижче альбедо, ніж забудовані території. Таким чином, альбедо поверхні є важливим параметром дослідження «Міських островів тепла», що впливає на поверхневу енергію матеріалу. Крім того, характеристики ґрунтового покриття впливають на взаємодію між поверхневим шаром землі і вхідним випромінюванням поверхні. Тому важливо аналізувати як денну, так і нічну температуру поверхні для визначення взаємозв'язку між типом матеріалу та LST. Збільшення щільності забудови збільшує накопичення тепла в міських районах, що призводить до тепліших ночей. Водойми та зелені насадження знижують температуру поверхні та її негативний вплив на навколишнє середовище. Отримані в роботі карти розподілу температури земної поверхні, індексу NDVI і УНІ можуть бути використані у задачах міського планування разом із традиційними джерелами просторової інформації (ортофотопланами, топографічними картами, картами землекористування тощо) для отримання нової інформації щодо поліпшення стійкості міста до хвиль тепла. Дані спостережень за УНІ необхідні для зонування ділянок з різними типами землекористування, на-

приклад, збільшення кількості відкритого простору і зелені, поліпшення теплового комфорту громадян.

ЛІТЕРАТУРА

1. Bhargava A., Bhargava S. (2018). Effects of Albedo in Urban Planning - Special Reference to Building Roofs. Examines Mar Biol Oceanogr., 1(2), 6–7. DOI:<https://doi.org/10.31031/EIMBO.2018.01.000506>
2. Tsou J., Zhuang J., Li Y., Zhang Y. Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong // Urban Sci. — 2017. — Vol. 1(10).
3. Lo C. P., Quattrochi A. D., Luvall J. C. Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat // Remote Sensing of Environment. – 1997. – Vol 18. – P. 287–304.
4. Voogt J. A., Oke T. R. Thermal remote sensing of urban climate // Remote sensing of Environment. – 2003. — Vol. 86(3). – P. 370–384.
5. Зацерковний В. І., Оберемок Н.В., Березіна П. О. Просторово-часовий аналіз «островів тепла» мегаполіса за супутниковими знімками LANDSAT. Наукоємні технології No 1(37), 2018, С. DOI:<https://doi.org/10.18372/2310-5461.37.12377>
6. Jin Yeu Tsou, Jing Zhuang, Yu Li, Yuanzhi Zhang. Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong. March 2017, Urban Science 1(1):10. DOI:<https://doi.org/10.3390/urbansci1010010>
7. Xiao J., Bonafoni S., Berger C. Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. Remote Sens. 2019, 11(1), 48; <https://doi.org/10.3390/rs11010048>
8. Wang W., Liu K. Remote sensing image-based analysis of the urban heat island effect in Shenzhen, China. April 2019, Physics and Chemistry of The Earth 110. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.01.002>
9. Garkusha, I.M., Busygin, B.S. Study of the temperature of the earth's surface the city of Dnepropetrovsk using multispectral scanners// GeoInformatics 2013 - 12th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, 2013.
10. Busygin, B., Garkusha, I. Technology mapping of thermal anomalies in the city of Dnipropetrovsk, Ukraine, with application of multispectral sensors // Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems - Proceedings of the International Forum on Energy Efficiency, 2013.
11. Kavats O., Khramov D., Sergieieva K., Vasyliev V. Algorithm for statistical downscaling of land surface temperature using ElasticNet // Review of the Bulgarian Geological Society, 2020, vol. 81, part 3, 195-197.

12. USGS Landsat Missions 2019 Using the USGS Landsat Level-1 Data Product. <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product>
13. Pat S., Chavez Jr. Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 62, No. 9, September 1996, pp. 1025-1036
14. Joan-Cristian P, Francisco-Javier M, Luis A, Lluís P., Xavier P. 2018 Radiometric Correction of Landsat-8 and Sentinel-2A Scenes Using Drone Imagery in Synergy with Field Spectroradiometry *Remote Sensing* 10, 1687.
15. Grigoraş G., Urişescu B. 2018 Spatial Hotspot Analysis of Bucharest’s Urban Heat Island (UHI) Using Modis Data *Annals of Valahia University of Targoviste. Geographical Series*

REFERENCES

1. Bhargava, A., & Bhargava, S. (2018). Effects of Albedo in Urban Planning - Special Reference to Building Roofs. *Examines Mar Biol Oceanogr.*, 1(2), 6–7. DOI:<https://doi.org/10.31031/EIMBO.2018.01.000506>
2. Tsou J., Zhuang J., Li Y., Zhang Y. Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong // *Urban Sci.* — 2017. — Vol. 1(10).
3. Lo C. P., Quattrochi A. D., Luvall J. C. Application of high-resolution thermal infrared remote sensing and GIS to assess the urban heat // *Remote Sensing of Environment.* — 1997. — Vol 18. — P. 287–304.
4. Voogt J. A., Oke T. R. Thermal remote sensing of urban climate // *Remote sensing of Environment.* — 2003. — Vol. 86(3). — P. 370–384.
5. Zatserkovnyi V. I., Oberemok N.V., Berezina P. O. Prostorovo-chasovyi analiz «ostroviiv tepla» mehapolisa za suputnykovyimi znimkamy LANDSAT. *Naukoiemni tekhnolohii* No 1(37), 2018, S. DOI:<https://doi.org/10.18372/2310-5461.37.12377>
6. Jin Yeu Tsou, Jing Zhuang, Yu Li, Yuanzhi Zhang. Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong. March 2017, *Urban Science* 1(1):10. DOI:<https://doi.org/10.3390/urbansci1010010>
7. Jingfeng Xiao, Stefania Bonafoni, Christian Berger. Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. *Remote Sens.* 2019, 11(1), 48; <https://doi.org/10.3390/rs11010048>
8. Weimin Wang, Kai Liu. Remote sensing image-based analysis of the urban heat island effect in Shenzhen, China. April 2019, *Physics and Chemistry of The Earth* 110. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.01.002>

9. Garkusha, I.M., Busygin, B.S. Study of the temperature of the earth's surface the city of Dnepropetrovsk using multispectral scanners// GeoInformatics 2013 - 12th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, 2013.
10. Busygin, B., Garkusha, I. Technology mapping of thermal anomalies in the city of Dnipropetrovsk, Ukraine, with application of multispectral sensors // Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems - Proceedings of the International Forum on Energy Efficiency, 2013.
11. Kavats, O., Khramov, D., Sergieieva, K., Vasyliiev, V. Algorithm for statistical downscaling of land surface temperature using ElasticNet // Review of the Bulgarian Geological Society, 2020, vol. 81, part 3, 195-197.
12. USGS Landsat Missions 2019 Using the USGS Landsat Level-1 Data Product. <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product>
13. Pat S. Chavez, Jr. Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, No. 9, September 1996, pp. 1025-1036
14. Joan-Cristian P, Francisco-Javier M, Luis A, Lluís P and Xavier P 2018 Radiometric Correction of Landsat-8 and Sentinel-2A Scenes Using Drone Imagery in Synergy with Field Spectroradiometry Remote Sensing 10, 1687.
15. Grigoraş G and Urişescu B 2018 Spatial Hotspot Analysis of Bucharest's Urban Heat Island (UHI) Using Modis Data Annals of Valahia University of Targoviste. Geographical Series.

Received 10.04.2023.

Accepted 12.04.2023.

Search and assessment of urban heat islands on digital satellite images

Formulation of the problem. The development of urbanization processes resulted in Urban Heat Islands (UHI) - ur-ban areas of high temperatures due to the dominance of artificial surfaces that absorb and retain heat. UHIs adversely affect the environmental conditions of cities and people's health. Satellite images in the thermal infrared range of the electromagnetic spectrum allow identifying areas of the high thermal background of urbanized territories for management decisions support aimed at improving urban landscapes.

The aim of the work is to develop a methodology for temperature anomalies analysis and urban heat islands detection on digital space images from Landsat 8 satellite in the thermal infrared range of the electromagnetic spectrum.

Methodology of UHI detection. The methodology proposed in the paper includes a sequence of stages of collecting, and preprocessing satellite data, generating land surface temperature maps, identifying temperature anomalies, comprehensive analysis of high-temperature zones based on different-time data, and identifying areas of high temperatures stable over time.

Land Surface Temperature estimation. Land Surface Temperature (LST) is estimated from the band 10 data of space images from the Landsat 8 satellite. The initial data are subjected to atmospheric correction, after which the spectral radiation in the band is converted to brightness temperature, and then to LST (Celsius degrees).

UHI mapping. On each survey date, UHIs are identified as temperature anomalies - LST map pixels with values higher than the LST mean plus standard deviation within the study area.

Time series analysis of satellite images. UHI mapping is based on a time series of Landsat 8 images acquired during the warm season (when ambient temperatures are above zero) to eliminate the effect of snow and ice on the observation results. According to the time series of LST maps of different years, stable temperature anomalies are distinguished - UHIs presented on all images of the time series.

Conclusions. Time-stable UHIs of the urbanized territory are mapped and analyzed using Landsat 8 LST data time series. The areas of the high thermal background are compared with the classes of the earth's surface. It is concluded that increasing urban density contributes to the accumulation of heat and increases the ambient temperature. The maps of LST distribution, vegetation indices, and UHI generated in the work can be used in urban planning tasks together with traditional sources of spatial information to obtain new information on improving the city's resistance to heat waves. UHI observation data are necessary for zoning areas with different land use types, for example, increasing the amount of open space and greenery, and improving the thermal comfort of citizens.

Keywords: urban heat island, land surface temperature, LST albedo, UHI, Earth remote sensing, aerospace monitoring, thermal imaging.

Каштан Віта Юріївна – к.т.н, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету "Дніпровська політехніка" (м. Дніпро).

Сергєєва Катерина Леонідівна — к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету "Дніпровська політехніка" (м. Дніпро).

Коробко Ольга Валеріївна – асистент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету "Дніпровська політехніка" (м. Дніпро).

Іванов Денис Валерійович – асистент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Національного технічного університету "Дніпровська політехніка" (м. Дніпро).

Kashtan Vita – Ph.D., Associate Professor of the Information Technology and Computer Engineering Department of Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Sergieieva Kateryna — Ph.D., Associate Professor of the Information Technologies and Computer Engineering Department of Dnipro University of Technology.

Korobko Olha - Assistant Professor of the Information Technologies and Computer Engineering Department of Dnipro University of Technology.

Ivanov Denys - Assistant Professor of the Information Technologies and Computer Engineering Department of Dnipro University of Technology.

**ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ СТРІЧКОВИМ КОНВЕЄРОМ
У СКЛАДІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТРАНСПОРТУВАННЯ
РУДНОЇ МАСИ КЕРУЮЧИ НАТЯГОМ СТРІЧКИ**

Анотація. Запропоновано оптимальне керування конвеєром у транспортному потоці завдяки зміни натягу стрічки з метою зниження витрат на транспортування вантажу за допомогою збільшення терміну експлуатації стрічки і зниження витрат на енергоспоживання.

Пропонується для усунення аварійного пробуксування стрічки на барабані та її надмірного стирання в процесі транспортування рудної маси застосовувати керування натягом стрічки. Для реалізації методу керування, що розробляється, необхідно використовувати математичну модель з розподіленими параметрами, на основі якої і буде сформована модель оптимального керування.

Керування такого роду об'єктами обумовлюється технологічною необхідністю компенсації ковзання стрічки на приводному барабані конвеєра, в основі якого лежить процес передачі руху за допомогою тертя, і реалізується шляхом зміни теплового поля на дузі обхвату за допомогою зміни натягу стрічки конвеєра або швидкості обертання барабана.

Таким чином, з точки зору теорії керування системами з розподіленими параметрами в процесі керування тепловим полем приводного барабана та стрічки як керована координата виступає температура або її розподіл на дузі обхвату.

Внаслідок зміни окружного зусилля на приводному барабані змінюється тиск стрічки на футерування барабана, що призводить до зміни величини теплового потоку як за амплітудою, так і за просторовим розподілом (змінюється величина дуги робочого ковзання $\alpha_{ск}$, тобто площа пружної взаємодії), що компенсується шляхом керування натягом стрічки.

Ключові слова: стрічковий конвеєр, фрикційна пара, кут робочого ковзання, теплове поле, оптимальне керування.

Розвиток мікропроцесорної техніки та застосування її у промисловому виконанні для управління технологічними процесами дозволило відійти від старих принципів побудови АСК ТП, які базувалися на принципах передачі двопровідною лінією. Застосування сучасних мережевих технологій дозволило

підвищити швидкість передачі і при цьому розширити її обсяг, що дозволяє системі виконувати як аварійні відключення і блокування, пов'язані з неузгодженою роботою конвеєрів, але здійснювати попереднє їм управління, що дозволяє виключити можливі ситуації.

Яскравим прикладом застосування АСК ТП конвеєрною лінією на базі сучасних промислових мікроконтролерів є система управління конвеєрним трактом дробильної фабрики ДФ-3 гірничо-збагачувального комбінату ПівніГЗК (Кривий Ріг).

Розробки систем автоматизованого керування конвеєрними лініями ведуться з часів початку застосування стрічкових конвеєрів. Так у 60-ті роки авторами роботи [1] були сформульовані вимоги до систем автоматичного керування лініями стрічкових конвеєрів:

1. Централізований автоматичний пуск всіх конвеєрів лінії необхідної послідовності, з необхідної витримкою часу між включенням двигунів конвеєрів.

2. Дистанційний візуальний контроль за пуском та роботою конвеєрів.

3. Автоматичний контроль часу запуску (нормального розгону) окремих конвеєрів.

4. Автоматизований контроль стану механізмів встановлення та автоматичне відключення конвеєра при механічних пошкодженнях, зупинці або пробуксуванні його стрічки.

5. Автоматичне відключення всіх конвеєрів, що передають вантаж на конвеєр, що зупинився.

6. Можливість зупинки всієї конвеєрної лінії з пункту керування та екстреної зупинки електродвигунів з будь-якого місця вздовж конвеєрної лінії або з місця встановлення двигунів.

7. Місцевий ручний пуск будь-якого конвеєра поза блокувальною заленістю під час ремонту регулювання та випробування.

8. Двостороння звукова оперативна та попереджувальна сигналізація.

9. Автоматичне приведення схеми у положення "вимкнено" при знятті напруги.

10. Відключення конвеєра при сході стрічки убік, відключення наступних конвеєрів при переповненні перевантажувальної тички, пуск з пульта керування частини конвеєрної лінії з подальшим дозапуском решти, пуск та зупинка бічних відгалужень при розгалуженій схемі конвеєрної лінії.

У роботі [2] розглянуто постановку завдань для різних рівнів ієрархії АСК з точки зору теорії автоматичного управління. Для досліджень цікавить завдання нижчого рівня, що лежить в основі всієї піраміди ієрархії завдань управління. Це завдання керування окремими агрегатами чи технологічними процесами. Єдино розумним критерієм функціонування кожної окремої установки є технологічна собівартість, яка залежить від характеру перебігу технологічного процесу. У роботі класифікуються завдання:

- статична оптимізація, в якій існують обурення постійні часу, набагато більші за середній час знаходження об'єкта в статичному стані;
- оптимальна стабілізація об'єкта управління щодо деякого заданого стану;
- облік динамічних властивостей об'єкта за необхідності оперативного узгодження навантажень у масштабі всього виробництва.

У цій роботі будуть розглянуті питання виконання вимог до керування конвеєрною лінією, представлених у п. 4 вимог, що належать до роботи [1].

Пропонується для усунення аварійного пробуксування стрічки на барабані та її надмірного стирання в процесі транспортування рудної маси застосовувати керування натягом стрічки. Для реалізації методу керування, що розробляється, необхідно використовувати математичну модель з розподіленими параметрами, на основі якої і буде сформована модель оптимального керування із застосуванням принципів керування розглянутих у роботі [2].

Причина всіх питань, що розглядаються, закладена в параметрах вантажопотоку, що транспортується, який пред'являє вимоги до формування тягового фактора для реалізації, представлених вище фізичних процесів у фрикційній парі при транспортуванні матеріалу. Основний параметр це погонна маса матеріалу, що транспортується. Так в роботі, було виконано В.С. Волотковським, та отримано наступні результати. На стрічкових конвеєрах великої довжини від 467 до 1870 м, площа зірваної нижньої обкладки змінюється від 15 до 25%, що викликано виникненням пробуксування стрічки та великими значеннями напруги в нижній обкладці стрічки при її взаємодії з приводним барабаном. Підвищення завантаження конвеєра, ослаблений натяг стрічки призводить до збільшення дуги робочого ковзання, що підвищує стирання стрічки і може викликати аварійне пробуксування. У разі пробуксування зростає температура в зоні зчеплення стрічки та барабана, яка досягає 300-350 °С за 15 хвилин його роботи [4]. У разі робочого ковзання відбуваються втрати енергії,

що витрачаються на подолання сил тертя, частина яких викликає зміну температури у зоні контакту барабан – стрічка.

Дослідженням питань зміни температури займалися такі автори як М. А. Малютін, Л.І. Попов, В.Г. Пілецький та ін [3,4]. Вирішення проблеми створення системи автоматичного керування фрикційною парою приводний барабан-стрічка висуває як основне завдання побудова математичної моделі розподілу температури на дузі обхвату як об'єкта керування.

Керування такого роду об'єктами обумовлюється технологічною необхідністю компенсації ковзання стрічки на приводному барабані конвеєра, в основі якого лежить процес передачі руху за допомогою тертя, і реалізується шляхом зміни теплового поля на дузі обхвату за допомогою зміни натягу стрічки конвеєра або швидкості обертання барабана.

Проблема керування сприймається як завдання оптимального керування з розподіленими параметрами.

Підхід до побудови системи керування заснований на побудові оптимальної детермінованої моделі пари барабан-стрічка і організація керування по цій моделі. Під моделлю фрикційної пари приводної барабан-стрічка розуміється теплове поле $\tau_1(x, y, z, t)$, де x, y, z – декартові координати точки на приводному барабані або $\tau_1(R, \varphi, z, t)$, де R, φ, z – циліндричні координати точки, t -час.

Вважаємо, що температура по ширині барабана розподіляється рівномірно, у цьому випадку завдання розглядається лише в одній просторовій площині декартової (x, y) або циліндричної (R, φ) . Крайова задача зводиться до класу двовимірних рівнянь теплопровідності із постійними коефіцієнтами.

Таким чином, з точки зору теорії керування системами з розподіленими параметрами в процесі керування тепловим полем приводного барабана та стрічки як керована координата виступає температура або її розподіл на дузі обхвату.

При виборі керуючих впливів, що визначають режим охолодження (нагріву) робочої області фрикційної пари (дуги ковзання), необхідно дотриматися технологічних обмежень на допустиму величину температури робочої області, як вихідна координата об'єкта управління необхідно мати безпосередньо температурне поле $\tau_1(R, \varphi, z, t)$ або величину температури в заданій точці простору.

Процес керування будеється так, щоб найкращим чином за вибраним критерієм оптимальності досягти найкращого наближення величини теплового

джерела до бажаної його величини при дотриманні природних обмежень на керування та стан об'єкта.

Управління процесом нагрівання чи охолодження здійснюється шляхом зміни натягу стрічки. Опишемо цю дію деякою функцією $S(t)$ і підкоримо цю функцію наступному обмеженню

$$A_1 \leq S(t) \leq A_2, \quad (1)$$

де константи A_1 та A_2 відповідають граничним значенням керуючої величини.

Тепер необхідно встановити зв'язок між $\tau_1(t)$ і $S(t)$. Відповідно до термінів теорії автоматичного керування потрібно визначити передатну функцію системи, входом якої служить зміна натягу стрічки $S(t)$, а виходом температура нагріву $\tau_1(t)$ на дузі обхвату приводного барабана та стрічки конвеєра при їх фрикційному взаємодії. Можливі принаймні два способи опису цієї передавальної функції. Найпростіший із них полягає в наступному. Вважати-мемо, що між входом і виходом системи є лише дві елементарні ланки: ланка запізнювання, що характеризує затримку роботи приводу натяжної станції та кінцевої довжини конвеєра, і інерційна ланка, що враховує поступовість наростання температури при стрибкоподібній зміні натягу стрічки. При цьому зв'язок між $\tau_1(t)$ та $S(t)$ може бути виражений наступним рівнянням:

$$B \frac{d\tau_1}{dt} + \tau_1 = k \cdot S(t - \tau), \quad (2)$$

де τ - час запізнення, B - постійна часу інерційної ланки, k -статичний коефіцієнт передачі. Дане рівняння дає дуже спрощену картину роботи конвеєра, тому що натяг стрічки не може змінюватися стрибком, а змінюється під дією вантажу на стрічці та роботою приводу натяжної станції.

Більш точний опис зв'язку між функціями $\tau_1(t)$ і $S(t)$ може бути отриманий, якщо зробити повний тепловий розрахунок фрикційної пари барабан-стрічка, вирішуючи спільно з рівнянням теплопровідності (4), яке описує теплообмін у системі футерування барабана – дуга робочого ковзання – стрічка конвеєра.

Як критерій якості керування виберемо наступний функціонал

$$J = \int \int \int_D \left[\tau_1^*(R, \varphi, z) - \tau_1(R, \varphi, z, T) \right]^2 dR \cdot d\varphi \cdot dz, \quad (3)$$

де D - деяка просторова область, T - час процесу керування, $\tau_1^*(R, \varphi, z)$ -необхідний температурний розподіл.

Структурна схема математичної моделі буде у наступному вигляді (рис.1). Натяг стрічки, що змінюється приводом натяжної станції, змінює тягову здатність приводного барабана, що призводить до зміни температури в зоні

обхвату дуги фрикційної пари. Сигнал керування $\tau_1(t)$ та сигнал обурення $\alpha_{ск}(t)$ надходять на вхід блоку температурного поля, який представимо у вигляді функції

$$\tau_1(R, \varphi, z, t) = A(\tau_1(t), \alpha_{ск}(t)),$$

де A – деякий оператор.

Практично цей оператор є в загальному випадку рішенням диференціального рівняння в частинних похідних, яке описує процес теплообміну у фрикційній парі приводний барабан-стрічка. Знаходження оператора A для опису динаміки шуканих координат процесу керування і становить завдання керування.

Розглянемо детально формування крайової задачі, що включає рівняння теплопровідності, а також початкові та граничні умови.

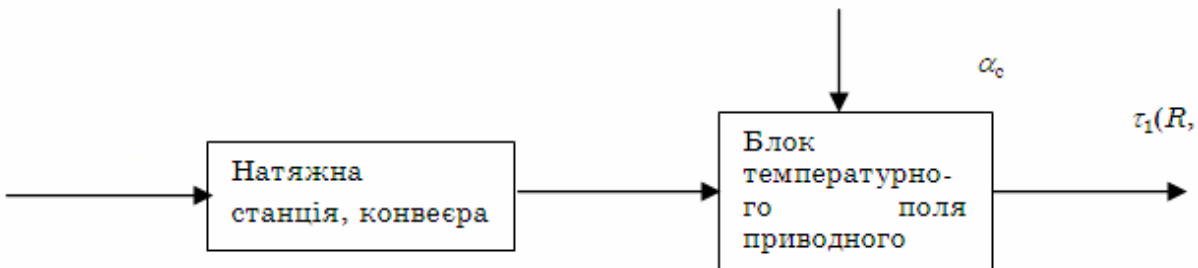


Рисунок 1 - Структурна схема моделі системи керування

Подібні крайові завдання раніше виконували автори [3,4] при моделюванні теплових процесів взаємодії приводного барабана та стрічки.

Рівняння теплопровідності є параболічним рівнянням, що характеризує нестационарні процеси температурного розподілу.

$$\frac{d\tau_1}{dt} = \zeta \left(\frac{d^2\tau_1}{dR^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{d\tau_1}{dR} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{d^2\tau_1}{d\varphi^2} + \frac{d^2\tau_1}{dz^2} \right) + q \quad t > 0; R_1 \leq R \leq R_2; 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad (4)$$

$$\frac{d\tau_2}{dt} = \zeta \left(\frac{d^2\tau_2}{dR^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{d\tau_2}{dR} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{d^2\tau_2}{d\varphi^2} + \frac{d^2\tau_2}{dz^2} \right) + q \quad t > 0; R_2 \leq R \leq R_3; 0 \leq \varphi \leq \pi,$$

де τ_1 – температура перегріву (понад температуру навколишнього повітря), град; ζ – коефіцієнт температуропровідності, м²/с; τ_2 – температура стрічки, град; R_1, R_2 – внутрішній та зовнішній радіуси барабана, включаючи футерування, м; R_3 – зовнішній радіус стрічки огинаючої барабан, м (рис. 2); q – джерело теплового потоку.

Як початкові умови задаємо температурний розподіл у початковий момент часу

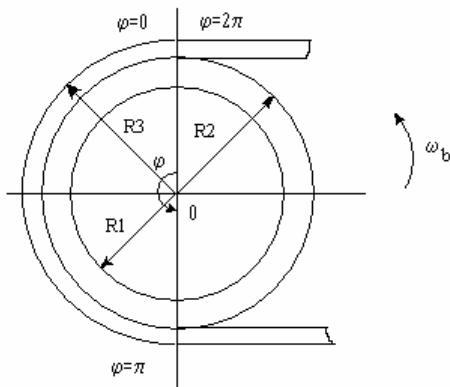


Рисунок 2 - Фрикційна пара барабан-стрічка конвеєра

$$\tau_1(R, \varphi, 0) = \tau_{10}$$

Як граничні умови використовуємо умови III-го роду, для опису процесів теплообміну футеровки барабану та стрічки конвеєра та теплообміну з навколишнім середовищем. При цьому не враховуємо теплообмін з навколишнім середовищем торцевих поверхонь стрічки та барабана, а також внутрішньої поверхні барабана та зовнішньої поверхні стрічки. Розглянуті тіла вважаємо однорідними ізотропними з постійними теплофізичними характеристиками.

Вважаємо, що температура по ширині барабана розподіляється рівномірно, у цьому випадку завдання розглядається лише в одній просторовій площині – циліндричній (R, φ) .

Граничні умови представимо у вигляді

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_1}{\partial R} \Big|_{R=R1} = \alpha_2 \cdot [\tau_1(R1, \varphi, t) - t_0], \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (5)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_2}{\partial R} \Big|_{R=R2} = \alpha_1 \cdot [\tau_1(R2, \varphi, t) - t_0], \quad 0 \leq \varphi \leq \pi \quad (6)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_2}{\partial R} \Big|_{R=R3} = \alpha_2 \cdot [\tau_2(R3, \varphi, t) - t_0], \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (7)$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial \tau_1}{\partial R} \Big|_{R=R2} = \alpha_2 \cdot [\tau_1(R2, \varphi, t) - t_0], \quad \pi \leq \varphi \leq 2\pi \quad (8)$$

$$\tau_1(R, \varphi, t) = \tau_1(R, \varphi + 2\pi \cdot n, t), \quad (9)$$

$$\frac{\partial \tau_1}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\varphi'} = \frac{\partial \tau_1}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\varphi'+2\pi \cdot n}, \quad n=0,1,2,\dots, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \tau_2}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=0} = \frac{\partial \tau_2}{\partial \varphi} \Big|_{\varphi=\pi} = 0, \quad (11)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу барабана та стрічки, Вт/м·град;
 α_1 - коефіцієнт теплообміну між поверхнями барабана і стрічки, їх взаємодії,

Вт/м²·град; α_2 - коефіцієнт теплообміну із повітрям зовнішньої поверхні барабана, Вт/м²·град [4]. Коефіцієнти ζ і λ пов'язані співвідношенням $\zeta = \lambda / c \cdot \rho$, где ρ - щільність тіла, що нагрівається, кг/м³; c - теплоємність, Дж/кг·град.

Для вирішення поставленого завдання використовуємо додаток PDE Toolbox (від англ. Partial Differential Equation – диференціальне рівняння у частинних похідних), який містить пакет MATLAB. Додаток забезпечує вирішення диференціальних рівнянь у частинних похідних методом кінцевих елементів двомірної постановки. Воно включає графічний інтерфейс; інструменти завдання форми рівнянь та граничних умов; процедуру автоматичної генерації сітки кінцевих елементів; засоби для візуалізації отриманого рішення та його анімації. Результат виконання подано на рис. 3

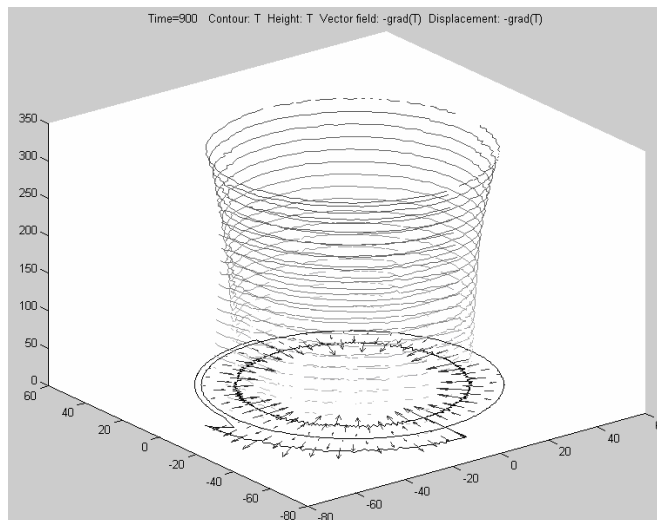


Рисунок 3 - Розподіл теплового поля у фрикційній парі барабан- стрічка при аварійному пробуксовуванні

Таким чином, завдання оптимального управління може мати таке формулювання. Для рівняння теплопровідності (4) з початковими та граничними умовами (5)-(11), включаючи рівняння зв'язку (2), потрібно підібрати таке керування $S(t)$, $0 \leq t \leq T$, яке задовольняє умові (1), щоб функціонал (3) задовольнив умову $J \leq \delta$ (де δ - деяке позитивне число, що характеризує точність наближення до бажаного розподілу) за мінімально можливий час T .

Внаслідок зміни окружного зусилля на приводному барабані змінюється тиск стрічки на футерування барабана, що призводить до зміни величини теплового потоку як за амплітудою, так і за просторовим розподілом (змінюється величина дуги робочого ковзання $\alpha_{ск}$, тобто площа пружної взаємодії), що компенсується шляхом керування натягом стрічки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Волотковский С. А., Фурсов В.Д. Автоматизация управления линиями ленточных конвейеров на рудных шахтах и карьерах // Изв. вузов Горный журнал. – 1960. -№12. -С.117-128.
2. Колесник В.В., Коробцов А.А. Производство с непрерывной технологией, как объект автоматического управления // Адаптивные системы автоматического управления. – 1973. - №1. - С. 70-77.
3. Малютин М. А., Попов Л.И. Исследование контактной температуры в приводах ленточных конвейеров // Изв. вузов. Горный журнал. – 1972. -№2. – С. 115-119.
4. Трошило В.С., Пилецкий В.Г. Исследование нагрева ленты конвейера при пробуксовке приводного барабана // Гірничя електромеханіка та автоматика. – 1999. - №2(61). – С. 200-204.

REFERENCES

1. Volotkovsky S.A., Fursov V.D. Automation of control lines of belt conveyors in ore mines and quarries // Izv. universities Mining magazine. - 1960. - No. 12. -p.117-128.
2. Kolesnik V.V., Korobtsov A.A. Production with continuous technology as an object of automatic control // Adaptive systems of automatic control. - 1973. - No. 1. - S. 70-77.
3. Malyutin M.A., Popov L.I. Investigation of contact temperature in drives of belt conveyors. Izv. universities. Mining magazine. - 1972. -№2. -WITH. 115-119.
4. Troshchilo V.S., Piletsky V.G. Investigation of the heating of the conveyor belt during the slipping of the drive drum. - 1999. - No. 2 (61). - S. 200-204.

Received 14.04.2023.

Accepted 18.04.2023.

Optimal control of the belt conveyor as part of the technological process of ore mass transportation by controlling the belt tension

Optimum control of the conveyor in the transport flow due to the change of the belt tension is proposed in order to reduce the costs of transporting goods by increasing the life of the belt and reducing energy consumption costs.

It is suggested to use tape tension control to eliminate the accidental slippage of the tape on the drum and its excessive abrasion during the transportation of the ore mass. To implement the control method being developed, it is necessary to use a mathematical model with distributed parameters, on the basis of which an optimal control model will be formed using the control principles considered in the work.

Control of this kind of objects is determined by the technological need to compensate for the slippage of the belt on the drive drum of the conveyor, which is based on the

process of transmission of motion using friction, and is implemented by changing the thermal field on the arc of the girth by changing the tension of the conveyor belt or the speed of rotation of the drum.

Thus, from the point of view of the theory of control of systems with distributed parameters, in the process of controlling the thermal field of the drive drum and belt, the controlled coordinate is the temperature or its distribution on the girth arc.

As a result of a change in the circumferential force on the drive drum, the pressure of the tape on the lining of the drum changes, which leads to a change in the value of the heat flow both in terms of amplitude and spatial distribution (the value of the working sliding arc changes, i.e. the area of elastic interaction), which is compensated by controlling the tension ribbons

Курганов Ігор Дмитрович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації, комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Криворізький національний університет.

Kurganov Igor Dmitrovich – Candidate of Technical Sciences, Senior Foreman of the Department of Automation, Computer Science and Information Technologies, Kryvyi Rih National University.

ПЕРЕТВОРЕННЯ У СИСТЕМІ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ ЧИСЛА З ОДНІЄЇ СИСТЕМИ МОДУЛІВ В ІНШУ

Анотація. Метою дослідження є аналітичний розгляд системи залишкових класів для реалізації операції перетворення чисел з однієї системи залишкових класів в іншу. Метод. Системний аналіз, теорія чисел і китайська теорема про залишки є інструментами методології дослідження. Метод використовує представлення числа як його залишками, так і в поліадичному коді. Методика базується на визначенні позиційних характеристик для даного модуля на основі отриманих позиційних характеристик для решти модулів вихідної системи з подальшою побудовою на їх основі залишків для модулів шуканої системи. Пропонований спосіб алгоритмічно простий. Результати. Виконано теоретичне обґрунтування розглянутого підходу для отримання ефективного розв'язку операції немодульного перетворення в системі залишкових класів для переходу від представлення числа однією системою модулів до його представлення іншою системою модулів. Показано, що запропонований спосіб забезпечує бажаний результат. На основі запропонованого підходу досягається підвищення ефективності операції перетворення. Наукова новизна. Запропоновано теоретичне обґрунтування представленого підходу до розв'язання операції немодульного перетворення в системі залишкових класів для переходу від представлення числа в одній системі модулів до його представлення в іншій системі модулів. Представляється доцільним застосувати запропонований підхід як перспективний напрямок дослідження складних операцій у системі залишкових класів. Практичне значення. Впливає з важливості теоретичних висновків та отриманих результатів дослідження. Воно базується на тому, що існує достатньо простий та ефективний підхід до вирішення задачі виконання немодульної операції перетворення в системі залишкових класів для переходу від представлення числа в одній системі модулів до його представлення в іншій системі модулів. Розглянуті рішення мають високу швидкодію та можуть бути ефективними при розробці модульних обчислювальних структур для перспективних інформаційних технологій.

Ключові слова: залишкові класи; системи модулів; діапазон чисел; перетворення.

Постановка проблеми. Застосування паралельної обробки даних на основі системи залишкових класів (СЗК) [1] дозволяє суттєво підвищити швидкодію операцій обробки даних. СЗК називається система числення, у якій довільне число представляється як набір найменших невід'ємних залишків по модулях m_1, m_2, \dots, m_n , тобто $N = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$. Тут $\alpha_i = N \pmod{m_i}$. При цьому, якщо числа m_i взаємно прості, то такому представленню відповідає лише одне число N діапазону $[0, M)$, де $M = m_1 m_2 \dots m_n$. Нехай системою основ поліадичного коду також є система m_1, m_2, \dots, m_r . Число N_1 в поліадичному коді представляється наступним чином

$$N_1 = \pi_1 + \pi_2 m_1 + \dots + \pi_i m_1 m_2 \dots m_{i-1} + \dots + \pi_n m_1 m_2 \dots m_{n-1},$$

де $0 \leq \pi_i \leq m_i - 1, i = 1, 2, \dots, n$.

При обробці даних, представлених в СЗК, часто необхідні проміжні перетворення чисел з однієї системи залишкових класів в іншу [2].

Вирішення такої задачі може знадобитися, наприклад, при розширенні діапазону представлення чисел, відновлення залишку, порівнянні чисел на підставі позиційних характеристик, визначенні рангу числа, модульному діленню чисел у тих випадках, коли здійснюється ділення на число, кратне одному або декільком модулям системи. Тому операція переходу від однієї системи модулів до іншої, при якій за відомими залишками числа в одній СЗК визначають значення залишків цього числа в іншій СЗК, відноситься до однієї з основних немодульних операцій в системі залишкових класів.

Формалізована постановка задачі така.

Нехай є дві СЗК $C1 = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$, $M_1 = m_1 m_2 \dots m_n$,

$C2 = \{p_1, p_2, \dots, p_r\}$, $M_2 = p_1 p_2 \dots p_r$ і число $N = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ таке, що

$$N = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) < \min \{M_1, M_2\}.$$

Необхідно для представлення числа $N = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ в СЗК $C1$ виконати перетворення на представлення $N = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_t, \dots, \beta_r)$ цього числа в СЗК $C2$, де $\beta_t = N \pmod{p_t}, t = 1, 2, \dots, r$.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вперше підхід до розв'язання цієї задачі запропонований у класичній роботі [1]. Наступні дослідження, наприклад [2], показали можливість більш економних рішень. Однак алгоритм [2] включає значну кількість різнотипних кроків, що збільшує час реалізації. У роботі [3] наведено рішення, що дозволяє спростити практичну реалізацію та прискорити одержання результату. У цій статті запропоновано ще один підхід, який також спрощує практичну реалізацію та прискорює одержання низки результатів.

Формулювання мети дослідження. Метою дослідження є аналітичний розгляд СЗК для реалізації операцій перетворення чисел з однієї системи залишкових класів в іншу.

Виклад основного матеріалу. Підхід до побудови алгоритму перетворення складається з двох етапів.

На першому етапі визначаються позиційні характеристики $0 \leq \pi_i \leq m_i - 1, i = 1, 2, \dots, n$ числа N в системі S_1 . На другому етапі на підставі отриманих позиційних характеристик формуються залишки $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_r$.

Отже, перший етап:

$$N_1 = \pi_1 + \pi_2 m_1 + \dots + \pi_i m_1 m_2 \dots m_{i-1} + \dots + \pi_n m_1 m_2 \dots m_{n-1}$$

$$\alpha_1 = N_1 \pmod{m_1} = \pi_1, \quad \pi_1 = \alpha_1.$$

На першій ітерації

$$N_2 = N_1 - \pi_1 = \pi_2 m_1 + \dots + \pi_i m_1 m_2 \dots m_{i-1} + \dots + \pi_n m_1 m_2 \dots m_{n-1} =$$

$$= m_1 (\pi_2 + \dots + \pi_i m_2 \dots m_{i-1} + \dots + \pi_n m_2 \dots m_{n-1})$$

$$\pi_2 = \left(\frac{N_2}{m_1}\right) \pmod{m_2}.$$

На другій ітерації

$$N_3 = N_2 - \pi_2 = \pi_3 m_2 + \dots + \pi_i m_2 \dots m_{i-1} + \dots + \pi_n m_2 \dots m_{n-1} =$$

$$= m_2 (\pi_3 + \dots + \pi_i \dots m_{i-1} + \dots + \pi_n \dots m_{n-1})$$

$$\pi_3 = \left(\frac{N_3}{m_2}\right) \pmod{m_3}.$$

.....

На i -й ітерації

$$N_{i+1} = N_i - \pi_i = \pi_{i+1} m_i + \dots + \pi_n m_i m_{i+1} \dots m_{n-1} =$$

$$= m_i (\pi_{i+1} + \dots + \pi_n m_{i+1} \dots m_{n-1})$$

$$\pi_{i+1} = \left(\frac{N_{i+1}}{m_i} \right) \pmod{m_{i+1}}.$$

На n -й ітерації

$$N_n = N_{n-1} - \pi_{n-1} = \pi_n m_{n-1}$$

$$\pi_n = \left(\frac{N_n}{m_{n-1}} \right) \pmod{m_n}.$$

Таким чином, отримано всі позиційні характеристики $0 \leq \pi_i \leq m_i - 1, i = 1, 2, \dots, n$ числа N в системі S_1

Другий етап.

Значення шуканих залишків приймається $\beta_1 = 0, \beta_2 = 0, \dots, \beta_t = 0, \dots, \beta_r = 0$.

На першій ітерації

$$\beta_t^1(1) = (\beta_t(0) + \pi_n) \pmod{p_t},$$

$$\beta_t^1(2) = (m_{n-1} \beta_t^1(1)) \pmod{p_t}.$$

На другій ітерації

$$\beta_t^2(1) = (\beta_t^1(2) + \pi_{n-1}) \pmod{p_t},$$

$$\beta_t^2(2) = (m_{n-2} \beta_t^2(1)) \pmod{p_t}.$$

.....

На r -й ітерації

$$\beta_t^r(1) = (\beta_t^{r-1}(2) + \pi_1) \pmod{p_t}.$$

Проілюструємо викладене для переходу від представлення числа $N = 1957 = (4, 7, 10, 1)$ в системі модулів $m_1 = 7, m_2 = 13, m_3 = 11, m_4 = 2$, $M_1 = m_1 m_2 m_3 m_4 = 7 * 13 * 11 * 2 = 2002$ до його представлення в системі модулів $p_1 = 5, p_2 = 17, p_3 = 27$, $M_2 = p_1 p_2 p_3 = 51 * 17 * 27 = 2295$, $M_2 > M_1$. До визначення залишків $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ їх початкові значення приймаються $\beta_1 = 0, \beta_2 = 0, \beta_3 = 0$.

Отже, перший етап.

$$\pi_1 = \alpha_1, \pi_1 = (4, 4, 4, 0)_1$$

Тому на першій ітерації згідно з $N_2 = N_1 - \pi_1$ - табл.1 із рядка 4,7,10,1 віднімаємо рядок 4,4,4,0 по модулях $m_1 = 7, m_2 = 13, m_3 = 11, m_4 = 2$. Отримуємо рядок 0,3,6,1, і в подальшому стовбець щодо $m_1 = 7$ вилучаємо із розгляду. Далі згідно з $\pi_2 = \left(\frac{N_2}{m_1}\right) \pmod{m_2}$ виконуємо ділення рядка 3,6,1 по модулях $m_2 = 13, m_3 = 11, m_4 = 2$ на $m_1 = 7$, тобто на рядок 7,7,1. Отримуємо рядок 6,4,1.

Таблиця 1

Число	Модулі				Ітерації
	7	13	11	2	
1957	4	7	10	1	
4	4	4	4	0	-
1953	0	3	6	1	=
7	x	7	7	1	:
279	x	6	4	1	=
6	x	6	6	0	-
273	x	0	9	1	=
13	x	x	2	1	:
21	x	x	10	1	=
10	x	x	10	0	-
11	x	x	0	1	=
11	x	x	X	1	:
1	x	x	X	1	=
1	x	x	X	1	-
0	x	x	X	0	=

Звідси $\pi_2 = 6, \pi_2 = (6, 6, 0)$.

На другій ітерації згідно з $N_3 = N_2 - \pi_2$ - табл.1 із рядка 6,4,1 віднімаємо рядок 6,6,0 по модулях $m_2 = 13, m_3 = 11, m_4 = 2$. Отримуємо рядок 0,9,1, і в подальшому стовбець щодо $m_2 = 13$ теж вилучаємо із розгляду. Далі згідно з $\pi_3 = \left(\frac{N_3}{m_2}\right) \pmod{m_3}$ виконуємо ділення рядка 9,1 по модулях $m_3 = 11, m_4 = 2$ на $m_2 = 13$, тобто на рядок 2,1. Отримуємо рядок 10,1.

Звідси $\pi_3 = 10$, $\pi_3 = (10, 0)$.

На третій ітерації згідно з $N_4 = N_3 - \pi_3$ - табл.1 із рядка 10,1 віднімаємо рядок 10,0 по модулях $m_3 = 11, m_4 = 2$. Отримуємо рядок 0,1, і в подальшому стовбець щодо $m_3 = 11$ теж вилучаємо із розгляду. Далі згідно з $\pi_4 = \left(\frac{N_4}{m_3}\right) \pmod{m_4}$ виконуємо ділення рядка 1 по модулю $m_4 = 2$ на $m_3 = 11$, тобто на рядок 1. Отримуємо рядок 1.

Звідси $\pi_4 = 1$, $\pi_4 = (1)$.

Другий етап ілюструється табл.2.

Таблиця 2

Число	Модулі			Ітерації
	5	17	27	
	Залишки			
0	0	0	0	
1	1	1	1	+
1	1	1	1	=
11	1	11	11	*
11	1	11	11	=
10	0	10	10	+
21	1	4	21	=
13	3	13	13	*
273	3	1	3	=
6	1	6	6	+
279	4	7	9	=
7	2	7	7	*
1953	3	15	9	=
4	4	4	4	+
1957	2	2	13	=

Перша ітерація.

До стрічки $\beta_1(0)$, тобто $\beta_1 = 0, \beta_2 = 0, \beta_3 = 0$, додаємо $\pi_4 = 1$ та отримуємо суму $\beta^1(1) = 1, 1, 1$ по модулях $p_1 = 5, p_2 = 17, p_3 = 27$. Отриману суму множимо на

$m_3 = 11$ по тих же модулях $p_1 = 5, p_2 = 17, p_3 = 27$ та отримуємо стрічку $\beta^1(2) = 1, 11, 11$.

Друга ітерація.

До стрічки $\beta^1(2) = 1, 11, 11$ додаємо $\pi_3 = 10$ та отримуємо суму $\beta^2(1) = 1, 4, 21$ по модулях $p_1 = 5, p_2 = 17, p_3 = 27$. Отриману суму множимо на $m_2 = 13$ по тих же модулях $p_1 = 5, p_2 = 17, p_3 = 27$ та отримуємо стрічку $\beta^2(2) = 3, 11, 3$.

Третя ітерація.

До стрічки $\beta^2(2) = 3, 11, 3$ додаємо $\pi_2 = 6$ та отримуємо суму $\beta^3(1) = 4, 7, 9$ по модулях $p_1 = 5, p_2 = 17, p_3 = 27$. Отриману суму множимо на $m_1 = 7$ по тих же модулях $p_1 = 5, p_2 = 17, p_3 = 27$ та отримуємо стрічку $\beta^3(2) = 3, 15, 9$.

Четверта ітерація.

До стрічки $\beta^3(2) = 3, 15, 9$ додаємо $\pi_1 = 4$ та отримуємо суму $\beta^4(1) = 2, 2, 13$ по модулях $p_1 = 5, p_2 = 17, p_3 = 27$. Отже, отримано число $N = 1957 = (2, 2, 13)$.

Таким чином, розглянутий алгоритм забезпечує перетворення представлення чисел у системах залишкових класів.

Висновки. Досліджено метод реалізації в системі залишкових класів проблемної операції переходу від представлення числа однією системою модулів до його представлення іншою системою модулів. Підхід базується на визначенні залишків за модулями вхідної системи на основі отриманих залишків по модулях вихідної системи. Показано, що запропонований метод забезпечує отримання шуканого результату. На основі запропонованого підходу досягається підвищення швидкодії виконання операції перетворення. Представляється доцільним застосувати запропонований підхід в якості перспективного напрямку досліджень складних операцій в системі залишкових класів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Акушкин И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах. М.: Советское радио. 1968. 440 с.
2. Магомедов Ш.Г, Преобразование представлений чисел в модулярной арифметике в системах остаточных классов с разными основаниями. Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. Махачкала. 2014. № 4. С.32-39.

3.Полисский Ю.Д. О преобразовании представлений чисел в остатках из одной системы модулей в другую // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2016, № 3 (63) С. 130-137.

REFERENCES

- 1.Akushsky I.Ya., Yuditsky D.I. Machine arithmetic in residual classes. M.: Soviet radio. 1968. 440 p.
- 2.Magomedov Sh.G. Transformation of representations of numbers in modular arithmetic in systems of residual classes with different bases. Bulletin of ASTU. Ser.: Management, computer technology and informatics. Makhachkala. 2014. No. 4. P.32-39.
- 3.Polissky Yu.D. On the transformation of representations of numbers in remainders from one system of modules to another // Science and progress of transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 2016, No. 3 (63), P. 130-137.

Received 14.04.2023.

Accepted 19.04.2023.

Transformation in the system of residual number classes from one system of modules to another

The purpose of the study. The purpose of the study is an analytical consideration of the system of residual classes for the implementation of the operation of converting numbers from one system of residual classes to another. Method. System analysis, number theory, and the Chinese remainder theorem are tools of the research methodology. The method uses the representation of the number both by its remainders and in the polyadic code. The methodology is based on determining the positional characteristics for this module on the basis of the received positional characteristics for the remaining modules of the original system, with the subsequent construction on their basis of the residuals for the modules of the sought system. The proposed method is algorithmically simple. The results. The theoretical substantiation of the considered approach to obtain an effective solution of the non-modular transformation operation in the system of residual classes for the transition from the representation of a number by one system of modules to its representation by another system of modules is performed. It is shown that the proposed method provides the desired result. On the basis of the proposed approach, an increase in the performance of the conversion operation is achieved. Scientific novelty. The theoretical justification of the presented approach to the solution of the non-modular transformation operation in the system of residual classes

for the transition from the representation of a number in one system of modules to its representation in another system of modules is proposed. It seems appropriate to apply the proposed approach as a prospective direction of research of complex operations in the system of residual classes. Practical significance. It follows from the importance of theoretical conclusions and obtained research results. It is based on the fact that there is a reasonably simple and effective approach to solving the problem of performing a non-modular conversion operation in the system of residual classes for the transition from the representation of a number in one system of modules to its representation in another system of modules. The considered solutions have high speed and can be effective in the development of modular computing structures for promising information technologies.

Поліський Юрій Давидович - кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Заслужений винахідник України, Науково-дослідний інститут автоматизації чорної металургії (НДІАчормет) м. Дніпро.

Polissky Yuriy Davydovych - candidate of technical science, senior researcher, Honored Inventor of Ukraine, Research Institute of Automation of Ferrous Metallurgy (NDIAchormet).

К.Ю. Островська, А.С. Мінаєнко

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ РІШЕННЯ ЗАДАЧ МЕДИЧНОГО ПРОФІЛЮ

Анотація. Робота присвячена дослідженню методів машинного навчання для рішення задач медичного профілю. Мета роботи - аналіз методів машинного навчання для підвищення точності та скорочення часу діагностики захворювань сечостатевої системи у дітей. Предмет дослідження – класифікатор захворювань сечостатевої системи пацієнтів Дніпропетровської обласної дитячої клінічної лікарні "Дніпропетровської обласної ради". В результаті дослідження вирішено такі завдання: зроблено аналіз літератури щодо застосування методів машинного навчання до захворювань сечостатевої системи; розроблено програму для вилучення в напівавтоматичному режимі необхідної інформації з виписок; проаналізовано бібліотеки мови Python та частину методів машинного навчання; проведено первинний аналіз та передобробка даних; застосовано методи класифікації, відбору ознак та заповнення пропущених значень; проаналізовано одержані результати та виконано обґрунтування результатів дослідження у предметній галузі.

Ключові слова: алгоритми, класифікатор, машинне навчання, діагностика захворювань, випадковий ліс, метод к найближчого сусіда, багат шаровий перцептрон, логістична регресія, градієнтний бустинг, дерево рішень.

Вступ. Аналіз літератури показав актуальність досліджень у галузі застосування методів машинного навчання до діагностики захворювань сечостатевої системи. Найбільш поширеними методами були: дерево рішень, випадковий ліс, наївний Байєсовський класифікатор, багат шаровий перцептрон та мережа радіально-базових функцій. Як ознаки зазвичай виступали деякі показники загального та біохімічного аналізу крові, а також антропометричні показники. У цьому дослідженні враховані результати аналізованих робіт, і навіть взято інші методи машинного навчання, розширено безліч ознак відповідно до наявними даними й у ролі цільової змінної використовувалися клінічні стану.

Мета роботи - аналіз методів машинного навчання для підвищення точності та скорочення часу діагностики захворювань сечостатевої системи у дітей.

Предмет дослідження – класифікатор захворювань сечостатевої системи пацієнтів Дніпропетровської обласної дитячої клінічної лікарні "Дніпропетровської обласної ради".

Актуальність роботи зумовлюється необхідністю підвищення точності та скорочення часу діагностики захворювань сечостатевої системи у дітей.

Практична значимість дослідження полягає у підборі та описі таких методів машинного навчання, які допоможуть лікарям проводити діагностику захворювань сечостатевої системи у дітей.

У дослідженні використовувалася база даних анамнезів (виписок) пацієнтів дитячого віку з різними захворюваннями сечостатевої системи Дніпропетровської обласної дитячої клінічної лікарні у період з 2014 по 2021 роки.

У виписках міститься важлива інформація про перебіг захворювань, що проводяться аналізах та лікуванні. Розмір бази даних – 3773 файли. Кожен файл формату *.docx був частково або повністю заповнений шаблон анамнезу пацієнта. Необхідно було написати програму для переведення всієї бази даних у стандартний табличний формат за допомогою парсингу.

Більшість виписки – це показники проведених обстежень, які були представлені у табличному вигляді (13 груп): загальний та біохімічний аналізи крові та сечі, коагулограма, протеїнограма, ліпидограма тощо.

Відповідно до рекомендацій лікаря було обрано лише перший тимчасовий шар та наступні групи для вилучення (всього 33 показника, крім клінічного стану):

1. Вікова група: рік народження.
2. Загальний аналіз крові.
3. Біохімічний аналіз крові.
4. Загальний аналіз сечі.
5. Клінічні стани: піелонефрит, гломерулонефрит, тубулоінтерстиціальний нефрит.

Усього 2881 пацієнтів із даними клінічними станами, які згодом використовувалися для аналізу.

Неможливість автоматичного вилучення необхідної інформації з анамнезів обумовлюється кількома проблемами.

У виписках присутня велика кількість явних та неявних друкарських помилок.

На рисунку 1 показаний інший приклад неявної друкарської помилки, яку доводиться виявляти та обробляти вручну: дві майже ідентичні виписки з різним віком в однієї й тієї самої людини.

Дніпропетровська обласна дитяча клінічна лікарня
"Дніпропетровської обласної ради"
Гастроентерологічне відділення (телефон: 056 378 8000)
Виписка з історії хвороби № 6089

ПІБ:
Вік: 11 років (15.11.2002р.)
Адреса:
Надійшов (ла): 26.11.2014р. Виписано (а): 10.12.2013р.
Діагноз: хронічний пієлонефрит, рецидивуючий перебіг, період клініко-лабораторної ремісії з порушенням концентраційної функції нирок. ПН0ст. Дізембріогнез нирок. Синдром Фрейлі справа (перегин у верхній великій чашці з порушенням відтоку). Хронічний бульозний цистит, неповна ремісія, Дисметаболічна нефропатія гіперкальціурія. Пгоз верхньої повіки ОД. Хронічний періодонтит.
При надходженні: Зріст 134 см. Вага 30 кг.
Скарги: зміни в аналізах сечі у вигляді лейкоцитурії, набряк повік вранці

Дніпропетровська обласна дитяча клінічна лікарня
"Дніпропетровської обласної ради"
Гастроентерологічне відділення (телефон: 056 378 8000)
Виписка з історії хвороби № 6089

ПІБ:
Вік: 11 р (15.11.02)
Адреса:
Надійшов (ла): 26.11.2014р. Виписано (а): 10.12.2013р.
Діагноз: хронічний пієлонефрит, рецидивуючий перебіг, період клініко-лабораторної ремісії з порушенням концентраційної функції нирок. ПН0ст. Дізембріогнез нирок. Синдром Фрейлі справа (перегин у верхній великій чашці з порушенням відтоку). Хронічний бульозний цистит, неповна ремісія, Дисметаболічна нефропатія гіперкальціурія. Пгоз верхньої повіки ОД. Хронічний періодонтит.
При надходженні: Зріст 134 см. Вага 30 кг.
Скарги: зміни в аналізах сечі у вигляді лейкоцитурії, набряк повік вранці

Рисунок 1 – Приклад неявної друкарської помилки

Іншою проблемою є наявність великої кількості відсутніх значень у показниках, що може бути результатом непотрібності даного показника у конкретного пацієнта, так і людським фактором.

Також анамнези були написані різними лікарями, кожен із яких має свій власний стиль написання, тому в програму складно та недоцільно включати всі варіанти.

Приклад перших п'яти оброблених документів показано на рисунку 2.

Diag	Age	Hb	L	Er	Ht	Tr	ESR	e	b	...	P	AIPh	Amy	G-GT	Color	SpGr	Prot	L(u)	Er(u)	F_ep	
0	11.0	2010.0	129.0	5.0	4.35	NaN	190.0	4.0	1.0	0.0	...	1.15	623.73	NaN	NaN	1.0	1010.0	0.0	1.0	0.0	0.0
1	12.0	2008.0	113.0	7.7	4.28	NaN	293.0	10.0	1.0	0.0	...	1.62	652.88	NaN	NaN	1.0	1019.0	0.0	1.0	0.0	1.0
2	12.0	2001.0	152.0	6.1	5.58	NaN	343.0	10.0	4.0	0.0	...	1.18	446.10	56.9	NaN	3.0	1002.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	7.0	2002.0	138.0	6.6	NaN	NaN	NaN	7.0	0.0	0.0	...	1.16	53.00	NaN	NaN	0.0	1005.0	0.0	10.0	0.0	0.0
4	7.0	2007.0	133.0	9.0	5.60	47.0	176.0	2.0	3.0	3.0	...	1.50	536.00	NaN	NaN	1.0	1020.0	0.0	1.0	0.0	1.0

5 rows x 34 columns

Рисунок 2 – Перші п'ять рядків таблиці даних

Відсутні значення позначені як NaN, показник "колір" ("Color") закодований цифрами від 0 до 6, а "діагноз" ("Diag") цифрами 7, 11, 12 відповідно до порядку вихідних діагнозів.

Завдання отримання показників з анамнезів пацієнтів може бути вирішене напівавтоматично: програма виробляє парсинг документів і видає помилки, які слід обробити вручну. Фрагмент коду, що показує загальну логіку роботи програми:

```
int number_err = 0;
for (int i = 0; i < files.size(); i++) {
    List row = getRow(files.get(i));
    // спроба отримати показники
    if (row.size() == 1) {
        // вивести докладну помилку, якщо спроба невдала
        number_err++;
        System.out.println(row.get(0) + files.get(i));13
        ...
    }
    else
        data.add(row);
}
```

В рамках дослідження було вирішено проблеми некоректного подання даних у виписках пацієнтів. Також з метою виконання поставленої задачі з вилучення ознак була написана програма, що витягує необхідну інформацію з анамнезів пацієнтів у напівавтоматичний режим. Результатом її роботи стала таблиця у форматі *.csv, що містить значення необхідних показників кожного пацієнта.

Перед застосуванням методів машинного навчання слід виконати первинний аналіз даних. Це дозволить зрозуміти деякі аспекти структури даних та виявити видимі закономірності у них.

По розподілу захворювань пацієнтів (рисунок 3) видно сильний дисбаланс, що слід враховувати під час виборів метрики якості і під час підбору гіперпараметрів і параметрів моделей.

На рисунку 4 видно, що у даних міститься велика кількість пропущених значень. Видалення об'єктів, у яких існує хоча б один недостатній показник, може призвести до втрати інформації та зниження якості класифікації. Для вирішення цієї проблеми можна використати методи заповнення пропущених значень. Перевіривши якість класифікації на даних без пропущених значень та із заповненими перепустками, можна оцінити доцільність використання методу заповнення пропущених значень.

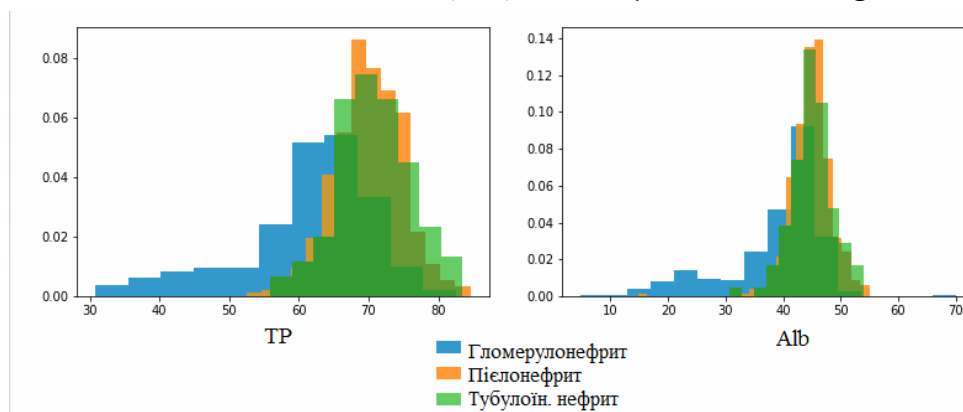


Рисунок 7 – Приклад гістограм розподілу

Аналогічно щодо графіків розсіювання попарних ознак(рисунок 8). Істинність припущення про інформативність тієї чи іншої ознаки класифікації можна оцінити, зокрема, за допомогою властивостей класифікаторів.

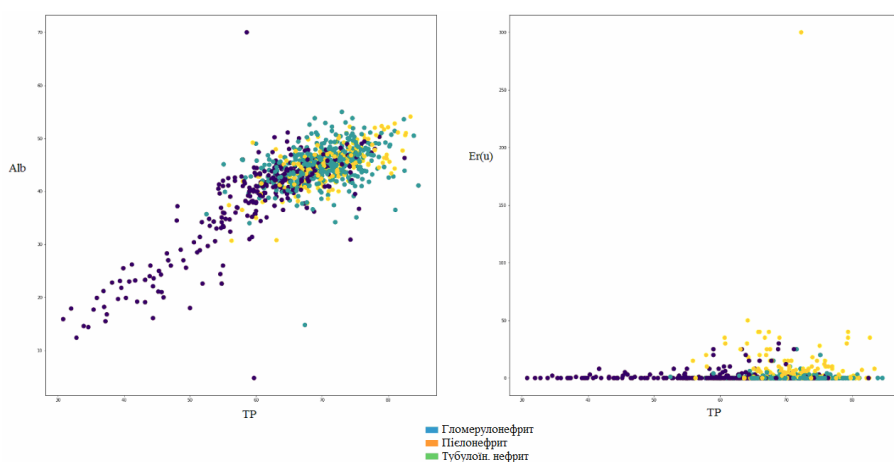


Рисунок 8 – Приклад графіків розсіювання

Виконавши зниження розмірності з метою візуалізації шляхом основних компонентів, можна побачити складну структуру даних (рисунок 9).

Пояснені дисперсії кожної компоненти становлять 12.1%, 8.3%, 7.5%, що у сумі дорівнює 27.9% поясненої дисперсії першими трьома компонентами. Це говорить про те, що 72.1% інформації залишається поза аналізом даного методу та якісно апроксимувати наявні дані лінійними різноманіттями розмірності 3 не вийде.

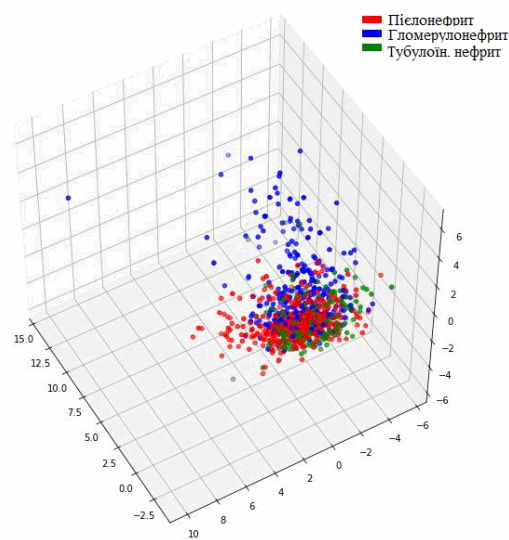


Рисунок 9 – Візуалізація методом головних компонент

Інший метод візуалізації - картка Кохонена, що самоорганізується, - здійснює нелінійне, впорядковане, гладке відображення даних на двовимірну решітку нейронів (карту). По побудованій карті видно, що є невелика кількість ознак та їх комбінацій, за якими можна оцінити чітку кластерну структуру даних, і навіть різні залежності між ознаками (рисунок 10). Ознаки, за картами яких видно рівномірність значень і кореляції коїться з іншими ознаками, були представлені на рисунку 10.

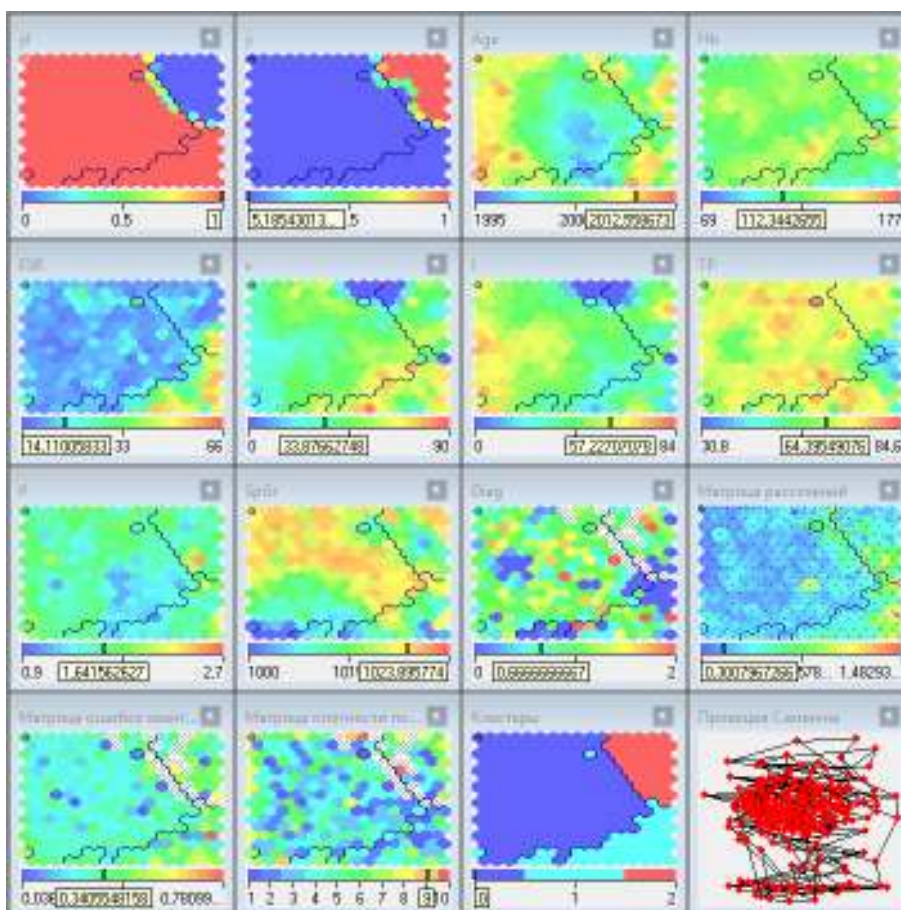


Рисунок 10 – Картка Кохонена, що самоорганізується

Для приведення числових ознак до єдиного масштабу використовувалася функція MinMaxScaler бібліотеки Scikit-Learn, яка перекладає задану множину значень ознак до певного діапазону. У цій роботі як діапазон використовувався відрізок [0, 1].

Номінальна ознака «колір» закодована за допомогою функції OneHotEncoder бібліотеки Scikit-Learn з використанням тільки перших двох значень, що його найчастіше зустрічаються: «с/ж», «жов».

Використані дані з медичних виписок пацієнтів мають складну багатовимірну структуру, значний дисбаланс у захворюваннях, велика кількість

пропущених значень, що необхідно враховувати під час застосування методів машинного навчання. Також багато методів вимагають від ознак певних властивостей, тому важливим етапом є передобробка даних, що запобігатиме уповільненню збіжності алгоритмів і зниження якості класифікації.

Після первинного аналізу та передобробки даних слідує етап застосування методів машинного навчання. У рамках цієї роботи використовувалися такі методи: дерево рішень (DT), випадковий ліс (RF), градієнтний бустинг (GB), логістична регресія (LR), метод К найближчих сусідів (KNN) та багат шаровий перцептрон (MLP).

Для кожного класифікатора представлена сітка з багатьох гіперпараметрів. Вона використовувалася для всіх підходів підвищення якості, і по ній було здійснено пошук оптимального набору гіперпараметрів, що забезпечує максимальне середнє збалансовану метрику якості *mcc* (Matthews correlation coefficient) за 5-блоковою перехресною перевіркою.

У таблиці 1 зазначено якість методів по 5-блоковій перехресній перевірці (*mcc cv*) після знаходження оптимальних гіперпараметрів.

Перехресна перевірка показує адекватність методу в цілому стосовно до даних.

Таблиця 1

Якість без відбору ознак та заповнення перепусток

	DT	RF	GB	LR	KNN	MLP
<i>mcc cv</i>	0.417	0.594	0.6	0.499	0.409	0.532

З метою підвищення якості класифікації можна використати метод рекурсивного відбору ознак RFE бібліотеки Scikit-Learn на базі результату роботи кожної моделі Він дозволить виявити такий набір інформативних ознак, який міг би спростити модель та підвищити її якість.

До існуючої сітки множин гіперпараметрів додалися потужності відбираються множин ознак: 2, 3, ..., $n-1$, де $n = 34$ після кодування номінального показника «колір».

На відміну від таблиці 1, у таблиці 2 зазначено якість методів відібраних інформативних ознак.

Таблиця 2

Якість з відбором ознак і без заповнення перепусток

	DT	RF	GB	LR	KNN	MLP
<i>mcc cv</i>	0.451	0.602	0.6	0.515	0.501	0.575

Дані містять велику кількість пропущених значень. Видаливши об'єкти з перепустками, можна втратити значну частину інформації в даних і погіршити якість класифікації.

З метою запобігання цьому наслідку в цій роботі використовувався метод К найближчих сусідів для заповнення пропущених значень.

У таблиці 3 зазначено якість методів на даних без відбору ознак і після заповнення пропущених значень методом К найближчих сусідів при $K = 5$ і евклідовою відстанню.

Таблиця 3

Якість без відбору ознак та із заповненням перепусток

	DT	RF	GB	LR	KNN	MLP
<i>mcc cv</i>	0.358	0.541	0.554	0.453	0.364	0.503

Спроба підвищення якості класифікації можна застосувати метод рекурсивного відбору ознак цього разу після заповнення перепусток. Таблиця 4 показує якість методів після відбору ознак та заповнення перепусток.

Таблиця 4

Якість з відбором ознак та заповненням перепусток

	DT	RF	GB	LR	KNN	MLP
<i>mcc cv</i>	0.384	0.546	0.564	0.461	0.451	0.514

За графіками пошуку оптимальних гіперпараметрів моделей (без заповнення припусків) (рисунки 11 – 22) можна оцінити їхню стійкість.

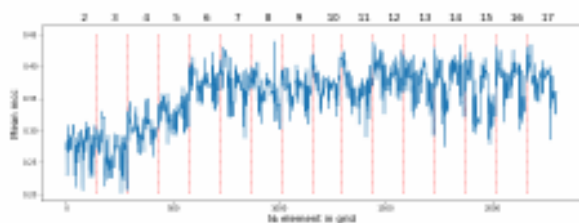


Рисунок 11 - Дерево рішень

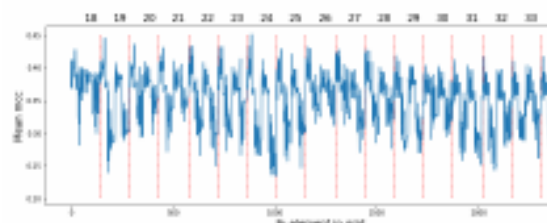


Рисунок 12 - Дерево рішень

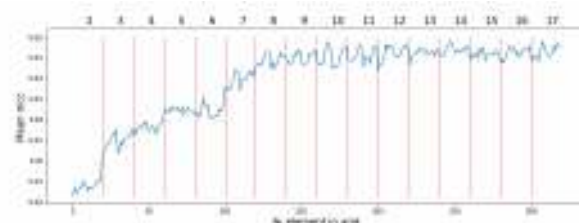


Рисунок 13 - Випадковий ліс

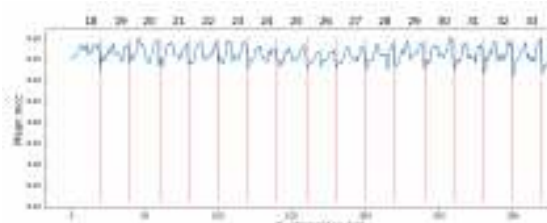


Рисунок 14 - Випадковий ліс

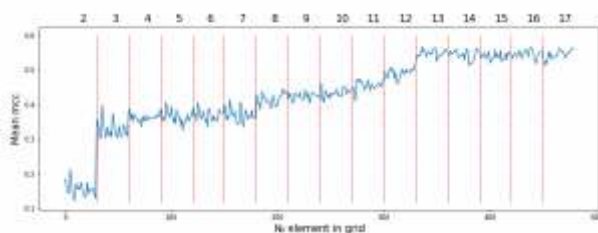


Рисунок 15 - Градієнтний бустинг

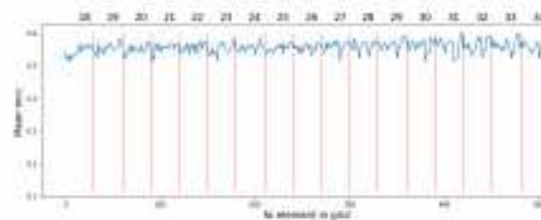


Рисунок 16- Градієнтний бустинг

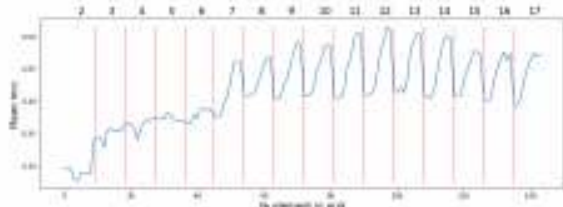


Рисунок 17 - Логістична регресія

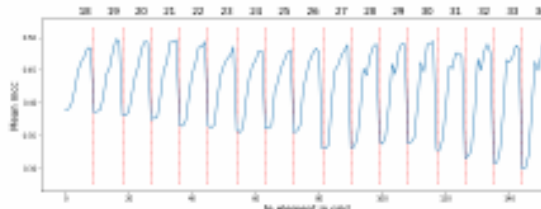


Рисунок 18 - Логістична регресія

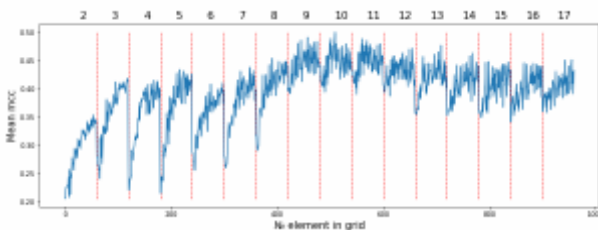


Рисунок 19 - Метод
К найближчих сусідів

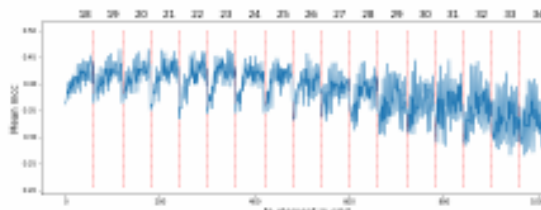


Рисунок 20 - Метод
К найближчих сусідів

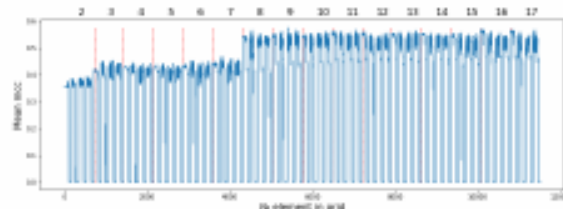


Рисунок 21 - Багатошаровий
перцептрон

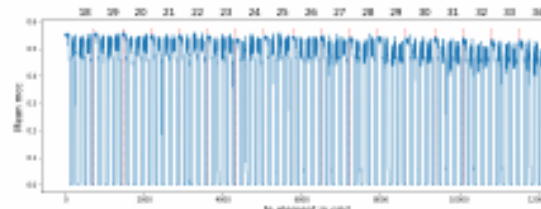


Рисунок 22 - Багатошаровий
перцептрон

З рисунків 11 – 22 видно, що випадковий ліс і градієнтний бустинг мають більшу в порівнянні з іншими моделями стійкість щодо гіперпараметрів: їх мале зміна веде до малої зміни якості по перехресній перевірці як всередині певної множини ознак, і глобально, починаючи з певної потужності. Це правильно до і після заповнення перепусток.

Розглянуті методи машинного навчання показали різні результати наявних даних. Зокрема, випадковий ліс та градієнтний бустинг дали кращу в порівнянні з іншими методами якість по перехресній перевірці та були більш стійкими щодо гіперпараметрів. Все це є показником їх адекватності стосовно

даних. Метод відбору ознак значно підвищив адекватність моделей, а метод заповнення перепусток лише погіршив її.

Після попередніх етапів необхідно перевірити вже навчені моделі на тестовому наборі даних: такому наборі, який брав участь у пошуку гіперпараметрів і параметрів моделей.

Така перевірка дозволить оцінити передбачувану здатність моделі та зрозуміти, наскільки добре вона може працювати на практиці.

Для оцінки якості навчених моделей використовувалися матриця неточностей класифікації (СМ) та мсс на тестовому наборі даних (мсс).

У зведеній таблиці 5 зазначено якість методів на тестовому наборі з різними підходами:

- (1) – без відбору ознак, без заповнення перепусток;
- (2) - з відбором ознак, без заповнення перепусток;
- (3) – без відбору ознак, із заповненням перепусток;
- (4) – з відбором ознак, із заповненням пропусків.

Таблиця 5

Якість на тестовому наборі

		DT	RF	GB	LR	KNN	MLP
(1)	СМ	58 19 7 19 66 24 7 13 29	59 24 1 8 97 4 5 27 17	69 12 3 8 90 11 9 19 21	60 17 7 11 74 24 7 16 26	53 30 1 6 93 10 6 36 7	59 22 3 11 91 7 7 25 17
	мсс	0.433	0.548	0.591	0.472	0.408	0.503
(2)	СМ	52 24 8 20 63 26 9 10 30	59 24 1 9 95 5 6 26 17	67 15 2 9 90 10 8 19 22	61 14 9 11 78 20 7 12 30	60 20 4 10 83 16 8 28 13	62 18 4 12 89 8 7 22 20
	мсс	0.385	0.532	0.584	0.533	0.429	0.53
(3)	СМ	135 45 35 65 202 95 35 40 69	155 53 7 21 331 10 18 91 35	163 43 9 31 316 15 24 75 45	160 36 19 57 230 75 25 47 72	111 92 12 19 335 8 12 125 7	146 59 10 34 307 21 23 90 31
	мсс	0.33	0.54	0.547	0.438	0.369	0.448
(4)	СМ	143 37 35 65 189 108 29 51 64	150 60 5 18 335 9 15 93 36	164 42 9 31 306 25 21 70 53	157 35 23 56 228 78 26 49 69	140 67 8 27 322 13 16 114 14	145 62 8 35 315 12 26 90 28
	мсс	0.314	0.542	0.545	0.421	0.427	0.458

За таблицею 5 видно, що градієнтний бустинг має велике значення метрики якості на тестовому наборі щодо всіх підходів, що говорить про кращу передбачувальну здатність. Що стосується самих підходів, то в цілому метод відбору ознак покращив передбачувальну здатність тільки метод К найближчих

сусідів: до і після заповнення перепусток його якість підвищилася. Інші випадки є суворо однозначними. Метод заповнення перепусток загалом лише погіршив якість більшості методів на тестовому наборі, і навіть знизив оцінку якості методів по перехресній перевірці, що ставить під його застосування практично.

Також класифікатори зазвичай гірше розпізнають тубулоінтерстиціальний нефрит, ніж інші захворювання. Зокрема, градієнтний бустинг без відбору ознак та заповнення перепусток розпізнав 21 випадок даного діагнозу з 49, 19 пацієнтів відніс до тих, хто має піелонефрит.

В результаті перевірки передбачуваної спроможності методів градієнтний бустинг показав більшу якість класифікації по всім підходам. Серед підходів методи відбору ознак та заповнення пропущених значень не покращили якість градієнтного бустингу на тестовій множині.

Загалом за всіма класифікаторами метод відбору ознак значно не покращив і не погіршив результати, а метод заповнення перепусток лише погіршив їх, тому перевірка доцільності використання його на практиці вимагає подальшого дослідження у цьому напрямі.

Отримані в цій роботі результати можуть мати практичну значимість, пов'язану з отриманням необхідної інформації з виписок пацієнтів для подальшого аналізу, а також теоретичну значущість, яка обумовлюється вибором градієнтного бустингу як методу підвищення точності і скорочення часу діагностики захворювань сечостатевої системи в дітей. Як інтерпретацію отриманих результатів та вибору градієнтного бустингу використовувалася специфіка даного методу, і навіть його математичні характеристики.

Висновки. Дослідження в галузі застосування методів машинного навчання до діагностики захворювань сечостатевої системи у дітей є актуальними на сьогоднішній день і проводяться як у нашій країні, так і за кордоном.

В рамках даної роботи були вирішені різні труднощі роботи з виписками пацієнтів і була написана програма, яка одержує необхідну інформацію з них у напівавтоматичному режимі.

Також були проаналізовані різні методи машинного навчання та підходи до підвищення їх якості стосовно вилучених даних. В результаті градієнтний бустинг показав більшу в порівнянні з іншими методами адекватність і передбачувальну здатність за всіма підходами. Метод рекурсивного відбору ознак загалом значно покращив і погіршив якість класифікаторів, а метод заповнення пропущених значень у більшості випадків сильно погіршив його.

Результати роботи показали необхідність розвитку цієї проблематики. Подальші дослідження в галузі застосування на практиці методів машинного навчання до діагностики захворювань сечостатевої системи у дітей можуть допомогти лікарю не тільки у вилученні інформації з масиву виписок та його аналізі, а й у скороченні часу постановки діагнозу та збільшенні його точності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мінцер О.П. Оброблення клінічних і експериментальних даних у медицині: навч. посібник / О.П. Мінцер, Ю.В. Вороненко, В.В. Власов - К.: Вища шк., 2003. - 350 с.
2. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. – М.: Физматлит, 2006. – 626–628 с.
3. Кохонен Т. Самоорганизующиеся карты / пер. 3-го англ. изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 655 с.
4. Голованова І.А. Основи медичної статистики: навч. посіб. для аспірантів та клінічних ординаторів / І.А. Голованова, І.В. Белікова, Н.О. Ляхова. – Полтава, 2017. – 113 с.
5. Фадеев П.А. Болезни почек. Пиелонефрит. – М.: Мир и Образование, 2011. – 180 с.
6. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / пер. с англ. А.А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 400 с.
7. Хайкин С. Нейронные сети: Полный курс / пер. с англ. Н.Н. Куссуль, А.Ю. Шелестова. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский дом Вильямс, 2008. – 1103 с.
8. Bauer E. An Empirical Comparison of Voting Classification Algorithms: Bagging, Boosting, and Variants / E. Bauer, R. Kohavi // Machine Learning. – 1999. – P. 105–139.
9. Boughorbel S. Optimal classifier for imbalanced data using Matthews Correlation Coefficient metric / S. Boughorbel, F. Jarray, M. El-Anbari // PLoS ONE 12(6). – 2017. – 17 p.
10. Breiman L. Bagging Predictors / L. Breiman // Machine Learning. – 1996. – P. 123–140.
11. D'Agostino R.B. An omnibus test of normality for moderate and large sample size / R.B. D'Agostino // Biometrika. – 1971. – Vol. 58, No. 2. – P. 341–348.
12. Gopika S. Machine learning Approach of Chronic Kidney Disease Prediction using Clustering Technique / S. Gopika, Dr.M. Vanitha // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 6, No. 7. – P. 14488–14496.

13. Hornik K. Approximation Capabilities of Multilayer Feedforward Networks / K. Hornik // *Neural Networks*. – 1990. – Vol. 4. – P. 251–257.
14. Kazemi Y. A novel method for predicting kidney stone type using ensemble learning / Y. Kazemi, S.A. Mirroshandel // *Artificial Intelligence in Medicine*. – 2017. – Vol. 79, No. 3. – P. 1696–1707.
15. Lambodar J. Distributed Data Mining Classification Algorithms for Prediction of Chronic Kidney Disease / J. Lambodar, K. Narendra // *International Journal of Emerging Research in Management and Technology*. – 2015. – Vol. 4, No. 11. – P. 110–180.
16. Ramya S. Diagnosis of Chronic Kidney Disease Using Machine Learning Algorithms / S. Ramya, N. Radha // *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. – 2016. – Vol. 4, No. 1. – P. 812–820.
17. Scott D.W. On Optimal and Data-Based Histograms / D.W. Scott // *Biometrika*. – 1979. – Vol. 66, No. 3. – P. 605–610.
18. United States Patent № US 7,657,521 B2, 02.02.2010. System and method for parsing medical data [text] / Fred E. Masarie, Stuart Lopez, Michael I. Lieberman // *United States Patent № US 7657521 B2*. 2010.
19. Yoruk U. Automatic Renal Segmentation for MR Urography Using 3D-GrabCut and Random Forests / U. Yoruk, B.A. Hargreaves, S.S. Vasanawala // *International Society for Magnetic Resonance in Medicine*. – 2017. – Vol. 79, No. 3. – P. 1696–1707.

REFERENCES

1. Mintser O.P. Obroblennia klinichnykh i eksperymentalnykh danykh u medytsyni: navch. posibnyk / O.P. Mintser, Yu.V. Voronenko, V.V. Vlasov - K.: Vyshcha shk., 2003. - 350 s.
2. Kobzar A.Y. Prykladnaia matematycheskaia statystyka. – M.: Fyzmatlyt, 2006. – 626–628 s.
3. Kokhonen T. Samoorhanyzuiushchiesia karti / per. 3-ho anhl. yzd. – M.: BYNOM. Laboratoryia znanyi, 2014. – 655 s.
4. Holovanova I.A. Osnovy medychnoi statystyky: navch. posib. dlia aspirantiv ta klinichnykh ordynatoriv / I.A. Holovanova, I.V. Bielikova, N.O. Liakhova. – Poltava, 2017. – 113 s.
5. Fadeev P.A. Bolezny pochek. Pyelonefryt. – M.: Myr y Obrazovanye, 2011. – 180 s.
6. Flakh P. Mashynnoe obuchenye. Nauka y yskusstvo postroeniya alhorytmov, kotorye yzvekaiut znaniya yz dannnykh / per. s anhl. A.A. Slynkyna. – M.: DMK Press, 2015. – 400 s.
7. Khaikyn S. Neironnie sety: Polnii kurs / per. s anhl. N.N. Kussul, A.Iu. She-lestova. – 2-e yzd., yspr. – M.: Yzdatelskyi dom Vyliams, 2008. – 1103 s.

8. Bauer E. An Empirical Comparison of Voting Classification Algorithms: Bagging, Boosting, and Variants / E. Bauer, R. Kohavi // Machine Learning. – 1999. – P. 105–139.
9. Boughorbel S. Optimal classifier for imbalanced data using Matthews Correlation Coefficient metric / S. Boughorbel, F. Jarray, M. El-Anbari // PLoS ONE 12(6). – 2017. – 17 p.
10. Breiman L. Bagging Predictors / L. Breiman // Machine Learning. – 1996. – P. 123–140.
11. D’Agostino R.B. An omnibus test of normality for moderate and large sample size / R.B. D’Agostino // Biometrika. – 1971. – Vol. 58, No. 2. – P. 341–348.
12. Gopika S. Machine learning Approach of Chronic Kidney Disease Prediction using Clustering Technique / S. Gopika, Dr.M. Vanitha // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 6, No. 7. – P. 14488–14496.
13. Hornik K. Approximation Capabilities of Multilayer Feedforward Networks / K. Hornik // Neural Networks. – 1990. – Vol. 4. – P. 251–257.
14. Kazemi Y. A novel method for predicting kidney stone type using ensemble learning / Y. Kazemi, S.A. Mirroshandel // Artificial Intelligence in Medicine. – 2017. – Vol. 79, No. 3. – P. 1696–1707.
15. Lambodar J. Distributed Data Mining Classification Algorithms for Prediction of Chronic Kidney Disease / J. Lambodar, K. Narendra // International Journal of Emerging Research in Management and Technology. – 2015. – Vol. 4, No. 11. – P. 110–180.
16. Ramya S. Diagnosis of Chronic Kidney Disease Using Machine Learning Algorithms / S. Ramya, N. Radha // International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. – 2016. – Vol. 4, No. 1. – P. 812–820.
17. Scott D.W. On Optimal and Data-Based Histograms / D.W. Scott // Biometrika. – 1979. – Vol. 66, No. 3. – P. 605–610.
18. United States Patent № US 7,657,521 B2, 02.02.2010. System and method for parsing medical data [text] / Fred E. Masarie, Stuart Lopez, Michael I. Lieberman // United States Patent № US 7657521 B2. 2010.
19. Yoruk U. Automatic Renal Segmentation for MR Urography Using 3D-GrabCut and Random Forests / U. Yoruk, B.A. Hargreaves, S.S. Vasanawala // International Society for Magnetic Resonance in Medicine. – 2017. – Vol. 79, No. 3. – P. 1696–1707.

Received 17.04.2023.
Accepted 20.04.2023.

***Research in machine learning methods
for solving problems of the medical profile***

The work is devoted to the study of machine learning methods for solving medical problems. The aim of the work is to analyze machine learning methods to improve the accuracy and reduce the time for diagnosing diseases of the genitourinary system in children. The object of research is machine learning methods. The subject of the study is a classifier of diseases of the genitourinary system of patients of the Dnipropetrovsk Regional Children's Clinical Hospital "Dnepropetrovsk Regional Council". As a result of the study, the following tasks were solved: an analysis of the literature on the application of machine learning methods to diseases of the genitourinary system was made; a program was developed to extract the necessary information on statements in a semi-automatic mode; Python libraries and part of machine learning methods were analyzed; primary analysis and processing of data was carried out; applied methods of classification, feature selection and filling in missing values; the obtained results were analyzed and the substantiation of the research results in the subject area was made.

Островська Катерина Юріївна – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій і систем НІІ ІПБТ УДУНТ.

Мінаєнко Анна Сергіївна – магістр кафедри інформаційних технологій і систем НІІ ІПБТ УДУНТ.

Ostrovska Kateryna Yuriyivna - Ph.D., associate professor, associate professor of the department of information technologies and systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

Minayenko Anna Serhiyivna - Master of the Department of Information Technologies and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

Є.С. Сулема, А.І. Дичка

ПРОГРАМНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА РОЗПОДІЛЕНОГО ЗБЕРІГАННЯ МЕДИЧНИХ ДАНИХ ПАЦІЄНТІВ

Анотація. Інформатизація медичної галузі є одним з пріоритетних завдань у системі охорони здоров'я. На сьогодні ступінь автоматизації процесів медичного обслуговування у медичних інформаційних системах є недостатнім, тому існує гостра потреба у посиленні захисту персональних і медичних даних пацієнтів електронними засобами, автоматизації доступу пацієнта до власних медичних даних та забезпеченні захищеності електронної взаємодії пацієнта з медичним персоналом. Метою дослідження є автоматизація процесів введення, пошуку та конфіденційного доступу пацієнтів до власних медичних даних на основі багатокольорового штрихового кодування інформації із застосуванням мобільних пристроїв. Запропоновано архітектуру програмної системи, у якій реалізовано принципи розподіленого зберігання медичних даних пацієнта та анонімності передачі даних за рахунок зчитування штрихкової інформації з одного смартфона камерою іншого смартфона. Це сприятиме підвищенню якості організації медичного обслуговування, забезпечуватиме суттєве зниження кількості помилок у процесі оброблення персональних даних пацієнтів та істотно посилюватиме захист медичних даних пацієнта.

Ключові слова: автоматична ідентифікація, медичні інформаційні системи, цифрова медицина, мобільні застосунки, програмне забезпечення, багатокольорне штрихове кодування

Постановка проблеми. Охорона здоров'я населення є одним з пріоритетів діяльності держави. З розвитком інформаційних технологій постає задача інформатизації медичної галузі. Цифрова медицина, електронна охорона здоров'я все більше проникають в життя суспільства. На порядку денному впровадження прогресивних інформаційно-комунікаційних рішень в галузь електронної охорони здоров'я, яка охоплює процеси накопичення, оброблення, аналізу та передачі цифрових медичних даних [1, 2].

Основними складовими електронної охорони здоров'я є медичні інформаційні системи та телемедичні мережі.

Медична інформаційна система (МІС) – це системно організована для вирішення завдань управління сукупність методів і засобів реалізації операцій збору, реєстрації, передачі, накопичення, пошуку, обробки і захисту медичної інформації на базі застосування спеціалізованого програмного забезпечення, включення до її складу необхідного медичного обладнання для отримання медичної інформації, використання засобів обчислювальної техніки, зв'язку та способів, за допомогою яких інформація надається користувачам [2].

МІС є програмно-технічним комплексом. Мета впровадження МІС – підвищення ефективності функціонування медичної установи і поліпшення обслуговування пацієнтів.

За допомогою МІС медична установа може: автоматизувати роботу реєстратури, упорядкувавши та спростивши процедуру запису пацієнтів на прийом, систематизувати інформацію про пацієнтів медичного закладу, медичні послуги і співробітників, управляти матеріальним фондом медичної установи, чергою на місця в стаціонарі, відстежувати рух медикаментів та медпрепаратів на складі і між відділеннями, упорядкувати роботу лабораторій і діагностичних кабінетів, організовувати оперативну передачу результатів досліджень фахівцям в автоматичному режимі, організовувати збір статистичних даних, готувати звіти та виконувати аналітичні дослідження, а також здійснювати управлінські рішення [3-6].

Аналіз існуючих МІС показує, що вони є переважно спеціалізованими, корпоративними, недостатньо функціонально розвиненими та не вирішують узагальнених завдань в системі електронної охорони здоров'я в масштабах країни. Недостатнім є ступінь автоматизації процесів при наданні медичних послуг, необхідно істотно знизити вплив людського фактору як при прийнятті медичних рішень, так і у виконавчій діяльності медперсоналу, посилити захист персональних та медичних даних пацієнтів, автоматизувати для пацієнта доступ до власних медичних даних, а також забезпечити електронну взаємодію між лікарем або медичним закладом та пацієнтом з використанням мобільних пристроїв.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В окремих секторах медичної галузі застосовують спеціалізовані медичні інформаційні та експертні системи. Наприклад, спеціалізовані програмні продукти: ASDSee, Aquilion ONE, Infinix CS-I, Horizon SE, XIDF-QCA801, використовують в комплексах променевої та ультразвукової діагностики – ультразвукова сонографія, комп'ютерна томографія, магнітно-резонансна томографія, ангіографія, ехасонографія, ен-

доскопія тощо. Для опрацювання отриманих діагностичних даних застосовують експертні системи, наприклад, Гастрограф 1Т, Stimul та ін. [7].

Для встановлення діагнозу та проведення діагностичних тестів використовують такі експертні системи: Експертна система постановки діагнозів Internist, BPLab, SpeseLabs Medical, Meditech, Omron, CardioVita та ін. [2].

У рамках міжнародного співробітництва створені експертні системи і бази даних: NUCLEUS – мультимедійне досье пацієнта, EMDIS – Європейська медична інформаційна система для донорів кісткового мозку, EPIC – Європейська модель лікування, FEST – база для європейських служб телемедицини, HDI 5000 – експертна система, що забезпечує обробку зображень, телекомунікаційні інфраструктури (ISAAC – інтегрована телекомунікаційна система, SHINE – стратегічна інформаційна мережа охорони здоров'я Європи), програми обслуговування окремих груп населення.

Нині в медичній галузі України використовують декілька інформаційних систем, серед яких «EMCIMEД», «Медучет», «Медіалог», «TherDer», «Astraia», «ЛисМедап», «Каштан», «Доктор Елекс», «Добробут» та інші [1, 2, 8].

Зазначені МІС є комерційним програмним забезпеченням (ПЗ). Паралельно з ринком комерційного ПЗ активно розвивається напрям застосування в галузі охорони здоров'я вільно-розповсюдженого ПЗ з відкритим кодом [8].

Наприклад, широко застосовують такі МІС з відкритим кодом як WorldVista, OpenEMR та OpenMRS [8, 9].

Набуває розвитку застосування мобільних пристроїв у системі охорони здоров'я (m-health), головне призначення яких посилити взаємодію пацієнта та лікаря. Так, за проектом ЕС, спрямованим на побудову дистанційної системи моніторингу здоров'я літніх людей з множинними хронічними захворюваннями, розроблено мобільний застосунок Ecaalux [10]. Маючи за мету залучення пацієнтів, опікунів і лікарів до оперативної взаємодії, розробники визначають основну функціональність мобільної платформи Ecaalux – бути посередником між мобільними пристроями, які використовують літні люди, та веб-сайтом медичних працівників, забезпечити лікаря і пацієнта інформацією про отримані дані вимірювання від давачів і про географічне розташування користувача (пацієнта) засобами GPS смартфона [11].

Мета дослідження. У МІС оброблення інформації починається з етапу введення даних про одиницю обліку, якою може бути будь-який запис (файл): персональні дані пацієнта, діагноз, результат певного дослідження, рецепт, припис лікаря, дозування препаратів тощо. Первинне введення текстової інфо-

рмації про одиницю обліку (запис, файл) здійснюється працівниками медуста-
нови – реєстратура, лікар, медсестра, лаборант та ін., шляхом ручного набору
текстових даних з клавіатури. Проте на наступних етапах оброблення та пере-
дачі інформації доцільно застосовувати технологію машиночитаного подання
даних, зокрема технологію штрихового кодування.

Метою дослідження є створення базової архітектури програмної систе-
ми, яка дозволяє спростити процес розроблення програмного забезпечення
для автоматизованого введення, обробки, пошуку та конфіденційного доступу
пацієнтів своїх медичних даних у медичній інформаційній системі на основі
багатоколірного штрихового кодування інформації з використанням мобільних
пристроїв.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основними процесами, які
мають підтримуватись та забезпечуватись програмним забезпеченням медич-
ної інформаційної системи на основі застосування штрихових кодів (ШК), є на-
ступні:

- формування запису про особу пацієнта;
- створення і оброблення записів про відвідування пацієнтом лікаря;
- формування записів результатів лабораторних досліджень;
- створення та оброблення записів про встановлений діагноз;
- генерування записів про формування доз медичних препаратів;
- завадостійке кодування даних з використанням багатоколірного штри-
хового коду;
- автоматичне зчитування штрихкодових позначок (ШК-позначок) з ек-
рана комп'ютера або смартфона, а також з паперового носія;
- надання доступу до медичних даних пацієнта на основі сканування
штрихового коду зі смартфона пацієнта;
- розподілене зберігання медичних даних пацієнта.

У розроблюваній системі передбачається використання завадостійкого
штрихового коду. Пропонується два рівні забезпечення завадостійкості штрих-
кодового зображення: на верхньому рівні – на основі коду Ріда-Соломона, а на
нижньому – на основі многозначного коду БЧХ (Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема)
або многозначного коду Хемінга. Многозначність визначається кількістю ко-
льорів, які використовуються для забарвлення елементів штрихкодового зо-
браження; найдоцільніше використовувати 3-5 кольорів. Багатоколірність
штрихкодового зображення підтримується сучасними комп'ютерами та смарт-
фонами. Багатоколірний ШК у кілька разів підвищує інформаційну щільність

подання даних порівняно з чорно-білими ШК без зміни геометричних розмірів елементів зображення [12-14].

Наприклад, чотириколірний ШК підвищує інформаційну щільність удвічі.

Носієм багатоколірного ШК в розроблюваній системі може бути екран комп'ютера (ноутбука, планшета), екран смартфона та паперова штрихкодів наліпка. Штрихкодів зображення передбачається зчитувати за допомогою камери смартфона.

Особливістю системи є й те, що з метою забезпечення анонімності пропонується також передача інформації зі смартфона на смартфон без залучення мережі або Bluetooth – штриховий код з екрана одного смартфона зчитують камерою іншого смартфона (своєрідна передача інформації з рук у руки).

Для забезпечення надійності такої передачі даних слід застосовувати саме завадостійкий ШК, який би забезпечував цілісність даних в умовах можливого спотворення штрихкодів зображення (зміна освітлення, кута сканування, тремтіння руки оператора, розмитість або перекошування зображення тощо).

Передбачається, що з системою працюють чотири категорії користувачів – медсестра, лаборант, лікар, пацієнт.

Однією з головних особливостей інформаційних систем в медичній галузі є підвищена увага до захисту особистих та медичних даних пацієнтів. З огляду на це архітектура розроблюваної програмної системи має базуватись на таких принципах: розподіленість, анонімізація, володіння даними.

Принцип розподіленості полягає у необхідності розділення даних про окремо взятого пацієнта таким чином, щоб навіть у випадку компрометації деякої частини даних зловмисник не міг встановити особу пацієнта на основі отриманих даних, а також встановити, що окремі фрагменти даних належать одному й тому самому пацієнту. Даний принцип пропонується реалізувати за допомогою децентралізованого зберігання інформації про пацієнтів у різних підсистемах. Систему зв'язків між даними у цих підсистемах пропонується зберігати у захищеній базі даних, доступ до якої суворо регламентується і піддається аудиту (рис. 1).

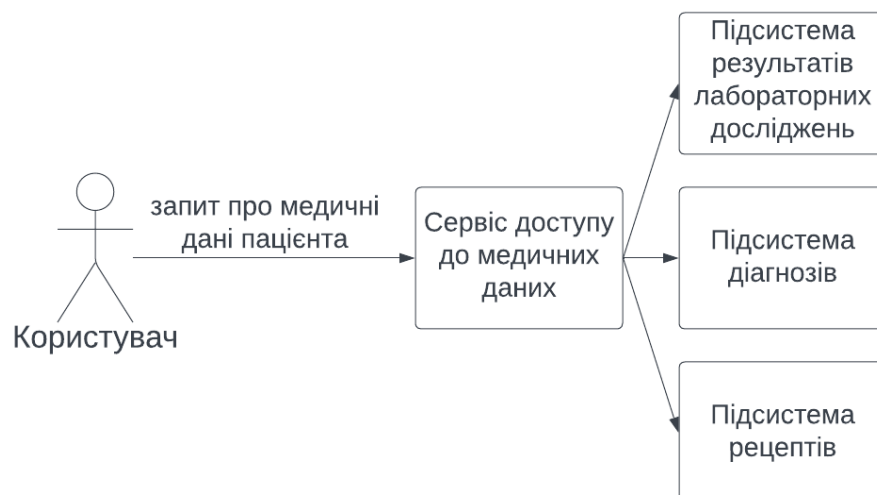


Рисунок 1 - Розподілене зберігання медичних даних у підсистемах медичної інформаційної системи

Принцип анонімізації передбачає відсутність у медичних даних будь-якої інформації, що ідентифікує конкретного пацієнта. Наприклад, медсестра при формуванні доз медичних препаратів не повинна мати доступу до діагнозу чи особистих даних пацієнта. Більше того, з метою посилення анонімізації пропонується розміщувати на посудині з дозованим медпрепаратом наліпку з ШК так, щоб лише медсестра та пацієнт могли зчитати його вміст за допомогою смартфона. Це мінімізує помилки медперсоналу; а пацієнт додатково перевірить, чи це адресовано саме йому, та за допомогою ШК отримає докладну інструкцію щодо вживання препарату (штрихкодова взаємодія медсестри та пацієнта). Зчитуючи смартфоном той самий ШК пацієнт отримує доступ до інформації, що стосується його особисто, а медсестра – до інформації, що стосується її як медпрацівника.

Принцип володіння даними означає, що доступ і обробка медичних даних пацієнта можливі лише за його безпосередньої згоди.

На основі викладених принципів, а також зазначених процесів розроблено архітектуру програмної системи (рис. 2).

Розглянемо взаємодію користувачів системи.

Медсестра формує дози препаратів для пацієнтів. На екрані свого смартфона або в додатку на ПК вона бачить інформацію про дози лікарських засобів, які необхідно сформулювати, ідентифікатори пацієнтів, номери палат куди їх потрібно доставити тощо. Після закінчення формування доз препаратів, медсестра друкує наліпку з ШК, в якому закодована інформація про найменування ліків, пацієнта, якому вони призначені тощо. Пацієнт, отримавши препарати з

штрихковою наліпкою, може впевнитися, що це призначено саме йому, зчитавши ШК з наліпки за допомогою свого смартфона.

Лаборант формує результати аналізів, знаючи ідентифікатор пацієнта. Він вносить результати в систему за допомогою програми на стаціонарному комп'ютері.

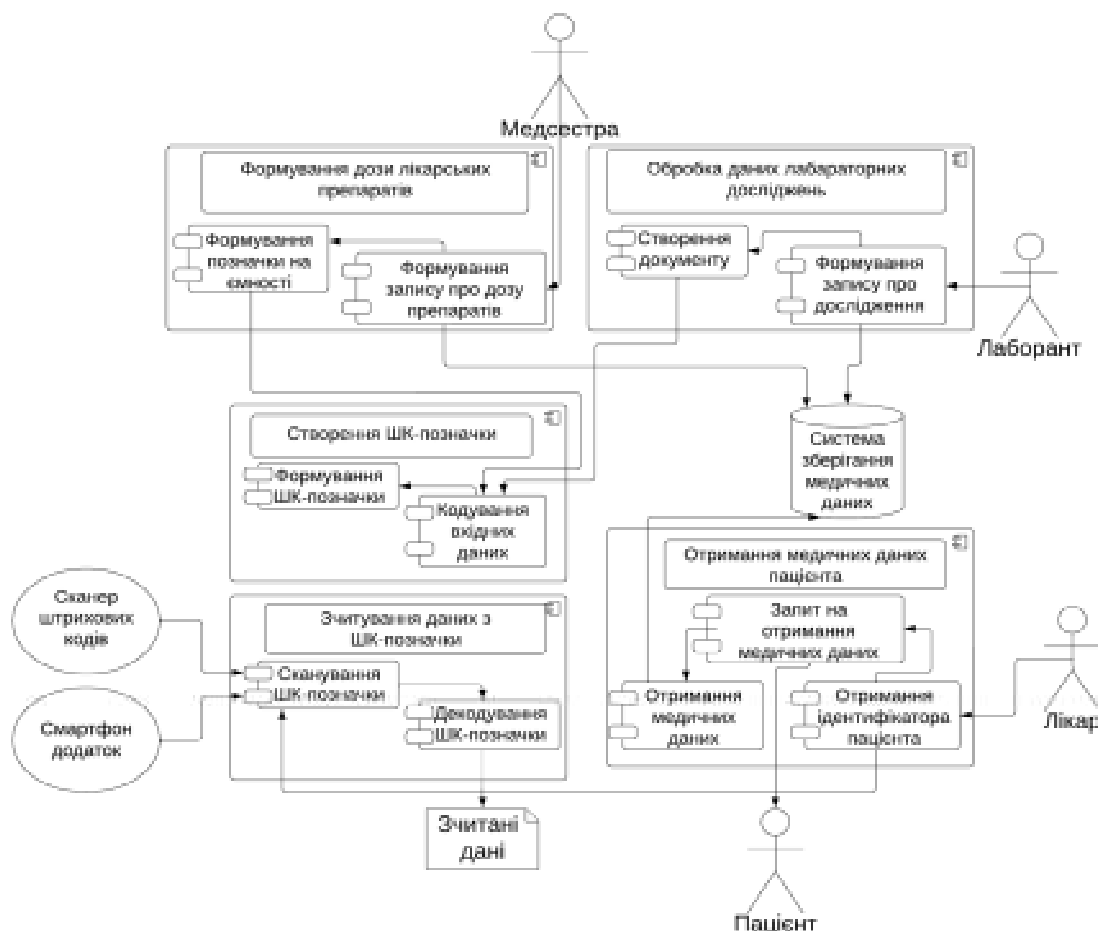


Рисунок 2 - Архітектура програмної системи

Система зберігає результати аналізів в базі даних, а також генерує ШК із закодованим ідентифікатором пацієнта, токеном доступу та посиланням для завантаження даних аналізів. Інформація кодується у форматі JSON (Javascript Object Notation) (рис. 3).

Токен доступу являє собою дані, зашифровані сервером. Для отримання даних аналізів за посиланням додаток пацієнта повинен відправити запит на сервер, приклавши до нього цей токен. Так сервер може визначити, що дані запитуються верифікованим клієнтом. Токен кодується у форматі JWT (Javascript Web Token). Отже, після того як лаборант вніс результати в систему і натиснув

на кнопку “зберегти”, згенерований ШК надсилаються електронним листом пацієнту (рис. 4).

```
{  
  "analysisId": "5a8c1b0e-3b9a-4f3c-8e2a-6f0f8d1f8d9c",  
  "patientId": "4b8a2b0f-4491-4ffa-9ff1-7f0128d678d9a",  
  "organizationId": "5a53dcb0a-4b11-31ed-8e2a-6f05faac1284",  
  "accessToken": "bt3g30gkic8cagpvvdsf4k50h507hnanq6ls7n89c06b4n05k0s3bhknri81sfjw67gfzynwjp  
mblsrolhv91ptotexjitkybiovapszwiqo7qywaqpub8uj7vhb6gy25fwnqljmo7z3ozr52b2eho3o3dzfqgrn4c  
h1x1ycx8itpfcnlm21grmymg2649q8ep18kn33geyv03ai25y37fnp3q6alipqr104ux6300xn4ktvusj0nvwv  
bq0q7j77djmucssgi3csbrqmeef2f6dekx",  
  "analysisResultLink": "https://www.barcoderesearch.com/analysis",  
  "analysisTime": "2020-09-09T15:00:00.000Z",  
  "analysisType": "file"  
}
```

Рисунок 3 - Приклад кодування інформації про надання доступу до даних у форматі JSON



Рисунок 4 - ШК-позначка для доступу пацієнта до результатів аналізу

Після цього пацієнт за допомогою свого смартфона сканує штрихкод. Додаток на смартфоні декодує інформацію і надсилає HTTP запит на сервер МІС. Сервер повертає дані аналізів, вони відображаються на екрані смартфона пацієнта.

Розглянемо взаємодію пацієнта з лікарем докладніше.

На прийомі в лікаря пацієнт може надати результати своїх аналізів лікарю. При цьому можна обрати один з двох режимів взаємодії – онлайн або офлайн. У випадку офлайн режиму пацієнт генерує на екрані свого смартфона ШК, у якому зашифровані самі дані аналізів безпосередньо (а не посилання на них). Лікар зчитує ШК з екрана смартфона пацієнта своїм смартфоном, та після його декодування на екрані бачить текстовий файл – результати аналізів.

При виборі режиму онлайн у ШК пацієнта буде закодоване посилання на результати аналізів. У цьому випадку працює механізм надання доступу до даних пацієнта в розподіленій системі зберігання медичних даних пацієнтів та їх отримання (рис. 5).



Рисунок 5 - Схема надання доступу до медичних даних пацієнта лікарю в онлайн режимі

Наведемо кроки алгоритму, що реалізує такий механізм (рис. 6).

1. Пацієнт виводить на екран свого смартфона штрихкод з його закодованим персональним ідентифікатором.
2. Лікар за допомогою свого смартфона сканує штрихкод з екрана смартфона пацієнта.
3. Додаток на смартфоні лікаря відправляє запит на отримання медичних даних пацієнта на сервер МІС.
4. Пацієнт на своєму смартфоні отримує нотифікацію про запит до своїх медичних даних і надає дозвіл.
5. Система ініціює запит до підсистеми зберігання медичних даних пацієнтів на формування тимчасового токена доступу.

6. Підсистема даних аналізів повертає токен системі доступу до медичних даних.
7. Система передає сформований токен на додаток лікаря.
8. Додаток лікаря запитує дані за токеном.
9. Додаток лікаря отримує запитувані дані.

Якщо пацієнт перебуває на віддалі, то він може надіслати свій ШК лікарю з використанням мережі. При цьому обробка ШК лікарем також може здійснюватися в двох режимах (онлайн чи офлайн) – за бажанням пацієнта.

У пропонованій системі одним з основних компонентів є штрихове кодування даних, тому слід сказати про ієрархію класів реалізації штрихового кодування/декодування, діаграма яких зображена на рис. 7.

У даній ієрархії використовується шаблон проектування “Стратегія”. За допомогою цього шаблону відбувається підключення конкретного коректувального коду.

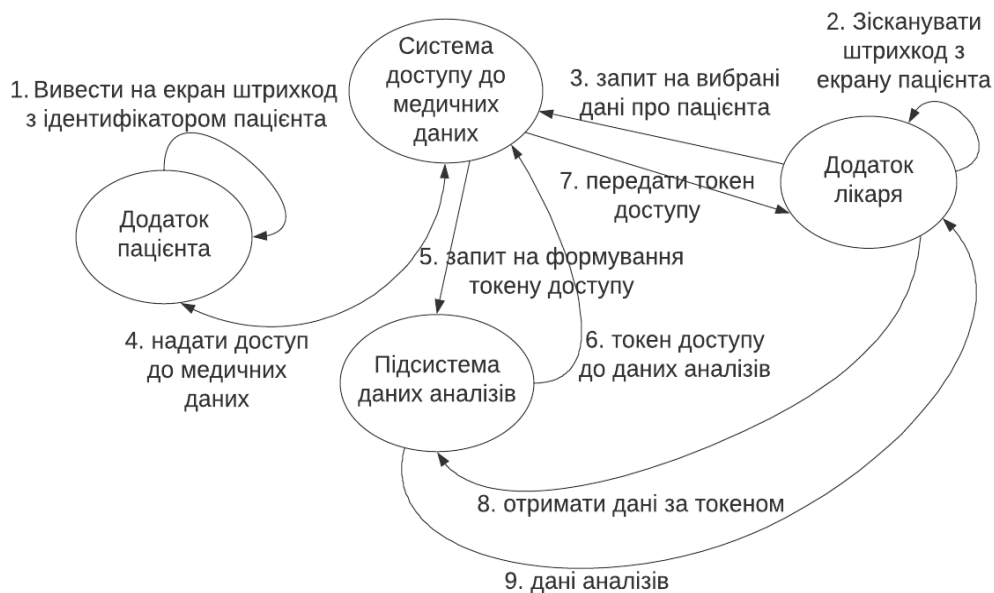


Рисунок 6 - Граф надання доступу до медичних даних пацієнта лікарю

Наприклад, при використанні коду БЧХ до екземпляру класу BarcodeDecoder буде підключена стратегія BCHCorrectionStrategy. За необхідності підключення іншого коректувального коду достатньо буде розробити новий клас з реалізацією алгоритму обраного коду.

Архітектура програмної системи (рис. 2) є базовою, вона містить набір компонентів, який дозволяє адаптувати її до потреб медичного закладу, а також спрощує процес розроблення програмного забезпечення для медичної галузі із застосуванням завадостійкого штрихового кодування даних.

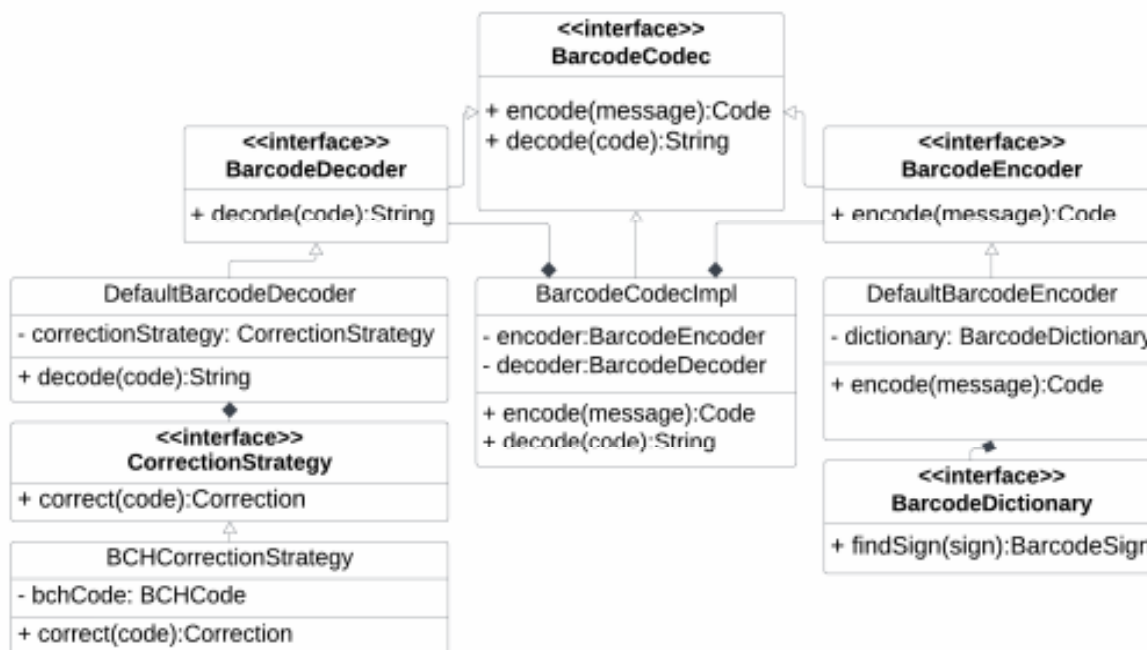


Рисунок 7 - Діаграма класів кодування/декодування ШК-позначок

Висновки. Запропонована архітектура програмної системи є ядром пацієнтоцентричної медичної інформаційної системи, у якій забезпечується можливість для пацієнта володіти своїми медичними даними та надавати доступ до них тільки за власним бажанням та шляхом автоматичної ідентифікації на основі штрихового кодування інформації.

Запропонована система є кроком до реалізації ідеї “медичина в смартфоні”.

Реалізовані в системі принципи розподіленого зберігання медичних даних пацієнта, володіння ним своїми медичними даними та анонімності за рахунок передачі даних з рук у руки з допомогою зчитування штрихкової інформації з одного смартфона іншим смартфоном дозволяють підвищити якість організації медичного обслуговування, істотно знизити вплив людського фактору в діяльності медперсоналу та посилити захист медичних даних пацієнта. Використання мобільних пристроїв паралельно зі штрихковим способом передачі та оброблення даних дозволяє забезпечити візуально захищену електронну взаємодію пацієнта з лікарем як безпосередньо, так і на відстані та гарантує високу надійність і конфіденційність обміну даними.

Базова архітектура програмної системи включає в себе універсальний набір модулів, що забезпечують реалізацію основних операцій в медичній інформаційній системі. Для розроблення конкретної програмної системи у медичній галузі достатньо адаптувати цей універсальний набір до потреб проєктова-

ної інформаційної системи, що в кінцевому підсумку спрощує процес розроблення програмного забезпечення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Хвищун А.І. Принципи формування єдиної медичної інформаційної системи великого міста / А. І. Хвищун, В. О. Качмар // Медична інформатика та інженерія. – 2009. - № 3. – С. 39 – 47.
2. Мельникова Н.І. Аналітичний огляд засобів програмного забезпечення в медичній галузі / Н. І. Мельникова, Н. Б. Шаховська // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2010. - № 673. – С. 146 – 153.
3. Міхнова А.В. Модель спеціалізованої медичної інформаційної системи служби крові / А. В. Міхнова, Д. К. Міхнов, К. С. Чиркова // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2019. – Випуск 5 (118). – С. 75 – 82.
DOI: 10.30929/1995-0519.2019.5.75-82
4. Mikhnova A. Information support model of production transfusion processes / A. Mikhnova, D. Mikhnov, K. Chyrkova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. Vol. 3/3 (81). – P. 36 – 43.
DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71673
5. Жалій Н.А. Самостійне програмне забезпечення як медичний виріб: особливості його класифікування та оцінювання відповідності // Стандартизація, сертифікація, якість. – 2020. - № 4. – С. 29 – 33.
6. Pashkov V. Medical device software: defining key terms / V. Pashkov, N. Gutorova, A. Harkusha // Wiadomosci Lekarskie. – 2016. – Vol. 6. – P. 813 – 817.
7. Азархов О.Ю. Процедура отримання діагностичної інформації для медичних інформаційних систем / О. Ю. Азархов, А. П. Моторний, Д. Х. Штофель // Український журнал телемедицини та телематики. – 2011. - Т. 9, № 2. – С. 161 – 165.
8. Семенець А.В. Розробка платформи системи підтримки прийняття рішень для медичної інформаційної системи з відкритим кодом OpenEMR / А. В. Семенець, В. П. Марценюк // Медична інформатика та інженерія. – 2015. - № 3. – С. 22 – 40.
9. Aminpour F. Utilization of open source electronic health record around the world: a systematic review / F. Aminpour, F. Sadoughi, M. Ahamdi // Journal of research in medical sciences: the official journal of Isfahan University of Medical Sciences. – 2014. -Vol. 19, № 1. – P. 57 -64.
10. Коваленко О.С. Мобільні застосунки у структурі сучасних медичних інформаційних систем / О. С. Коваленко, Л. М. Козак, О. О. Романюк, Т. А. Маресова, Л. В. Ненашев, Г. І. Финяк // УСiМ. – 2018. - № 4. – С. 57 – 69.
DOI <https://doi.org/10.15407/usim.2018.04.0057>

11. Dicianno B.E. Perspectives of the Evolution of Mobile (mHealth) Technologies and Application to Rehabilitation / B. E. Dicianno, B. Parmanto, A. D. Fairman, Th. M. Crytzer, D. X. Yu, G. P. Derek, C. A. Petrazzi // *Physical Therapy*. – 2015. – Vol. 95, № 3, P. 397 – 405.
12. 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
13. 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.
14. Sulema Ye.S. Synthesis of the Symbologies of Multicolor Interference-Resistant Bar Codes on the Base of Multi-Valued BCH Codes / Ye. S. Sulema, L. V. Drozdenko, A. I. Dychka // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2022. - № 4 (63). – P. 107 – 118. DOI: 10.15588/1607-3274-2022-4-9

REFERENCES

1. Hvyschun A.I. Principles of unified medical information system of big city/ A.I. Hvyschun, V.O. Kachmar // *Medychna informatyca ta inzheneriya*. – 2009. - № 3. – P. 39 – 47.
2. Melnykova N.I. Analytical review of tools in the medical field/ N.I. Melnykova, N.B. Shakhovska // *Visnyk Natsionalnoho universitetu “Lvivska polytechnika”*. – 2010. - № 673. – P. 146 – 153.
3. Mikhnova A.V. The model of specialized medical information system of blood service / A.V. Mikhnova, D.K. Mikhnov, K.S. Chyrkova // *Visnyk KrNU imeni Mykhayla Ostrohradskoho*. – 2019. – Issue 5 (118). – P. 75 – 82. DOI: 10.30929/1995-0519.2019.5.75-82
4. Mikhnova A. Information support model of production transfusion processes / A. Mikhnova, D. Mikhnov, K. Chyrkova // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. Vol. 3/3 (81). – P. 36 – 43. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71673
5. Zhalii N.A. Stand-alone software as a medical device: features of its classification and conformity assessment // *Standartyzatsiya, sertyfikatsiya, yakist*. – 2020. - № 4. – P. 29 – 33.
6. Pashkov V. Medical device software: defining key terms / V. Pashkov, N. Gutorova, A. Harkusha // *Wiadomosci Lekarskie*. – 2016. – Vol. 6. – P. 813 – 817.
7. Azarkhov O.Yu. Procedure of diagnostic information reception for medical information systems / O.Yu. Azarkhov, A.P. Motorny, D.Kh. Shtofel // *Ukrayinskyi*

zhurnal teledytsyny ta medychnoyi telematyky. – 2011. – Vol. 9, № 2. – P. 161 – 165.

8. Semenets A.V. On the CDSS platform development for the open-source MIS OpenEMR /A.V. Semenets, V.P. Martsenyuk // Medychna informatyca ta inzheneriya. – 2015. - № 3. – P. 22 – 40.

9. Aminpour F. Utilization of open source electronic health record around the world: a systematic review / F. Aminpour, F. Sadoughi, M. Ahamdi // Journal of research in medical sciences: the official journal of Isfahan University of Medical Sciences. – 2014. -Vol. 19, № 1. – P. 57 -64.

10. Kovalenko O.S. Mobile applications in the structure of modern medical information systems/ O.S. Kovalenko, L.M. Kozar, O.O. Romanyuk, T.A. Maresova, L.V. Nenashev, G.I. Finyak // USiM. – 2018. - № 4. – P. 57 – 69.

DOI <https://doi.org/10.15407/usim.2018.04.0057>

11. Dicianno B. E. Perspectives of the Evolution of Mobile (mHealth) Technologies and Application to Rehabilitation / B. E. Dicianno, B. Parmanto, A. D. Fairman, Th. M. Crytzer, D. X. Yu, G. P. Derek, C. A. Petrazzi // Physical Therapy. – 2015. – Vol. 95, № 3,. P. 397 – 405.

12 .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

13. 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.

14. Sulema Ye. S. Synthesis of the Symbologies of Multicolor Interference-Resistant Bar Codes on the Base of Multi-Valued BCH Codes / Ye. S. Sulema, L. V. Drozdenko, A. I. Dychka // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2022. - № 4 (63). – P. 107 – 118. DOI: 10.15588/1607-3274-2022-4-9

Received 17.04.2023.

Accepted 20.04.2023.

***Software system of automatic identification
and distributed storage of patient medical data***

Due to the rapid development of information technologies, informatization in the medical industry is essential. The main component of electronic health care is medical information systems designed for the accumulation, processing, analysis and transmission of medical data. In the medical field, specialized software products are used to perform diagnostic studies, process the results of laboratory tests, and make decisions at the stage of establishing a diagnosis. The use of mobile devices in medical information

systems is developing. However, the degree of automation of processes in the provision of medical services and the protection of the personal and medical data of patients is still insufficient.

The purpose of the research is to create a basic architecture of a software system that would simplify the process of developing software for automated input, processing, search and confidential patient access to their medical data in a medical information system based on multi-color barcoding of information using mobile devices.

The architecture of the software system is proposed, in which, based on the principles of distribution, anonymization, and data ownership, a patient can provide access to medical personnel to their medical data by reading a multi-color interference-resistant barcode from one smartphone (patient's) by the camera of another smartphone (doctor's).

It is shown that in order to ensure the reliability of such transmission, it is necessary to use an interference-resistant barcode, which would ensure the integrity of the data in the conditions of possible distortion of the barcode image (change in lighting, scanning angle, trembling of the operator's hand, blurring or skewing of the image, etc.).

The use of mobile devices for the barcode method of transmission and processing of data allows providing the protected electronic co-operating of a patient and a doctor both directly and remotely. It guarantees high reliability and confidentiality of the exchange of data.

The proposed technical solutions make it possible to improve the quality of medical care and strengthen the protection of the patient's medical data.

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».

ЗМІСТ

CONTENTS

Сироткіна Н.П., Тернова К.В. Регресійний аналіз імпульсних характеристик укороченого надзвукового сопла	3	Syrotkina N.P., Ternova K.V. Regression analysis of impulse characteristics shorted supersonic nozzle	3
Михайленко В.С., Каменєва А.В., Стукалов С.А., Зуй О.М. Моделювання нейромережевої системи ідентифікації та керування параметрами технічного об'єкта	10	Mykhailenko V., Kamienieva A., Stukalov S., Zui O. Modeling of a neural network-based system for identification and control of technical object parameters	10
Трофименко О.Г., Дика А.І., Лобода Ю.Г. Аналіз уразливостей та проблем безпеки вебзастосунків	25	Trofymenko O., Dyka A., Loboda Yu. Analysis of vulnerabilities and security issues of web applications	25
Стрельбіцький В.В., Бовнегра Л.В., Павлишко А.В. Аналіз міцності вил вилочного навантажувача чисельними методами	38	Strelbitskyi V.V., Bovnegra L.V., Pavlyshko A.V. Analysis of strength of a fork of the forklift by numerical methods	38
Балаханова Т.В., Кононенко Г.А., Сафронова О.А., Сафронов О.Л., Клинова О.П. Дослідження трансформації мікроструктури осьових заготовок після прокатування	46	Balakhanova T.V., Kononenko G.A., Safronova O.A., Safronov O.L., Klynova O.P. Analysis of the transformation of the microstructure of axial billets after rolling	46
Вохмянін Г.Я., Жульковський О.О., Жульковська І.І., Катан В.О., Клим В.Ю., Кузнецов І.І. Оцінка ефективності реалізації асинхронних обчислювальних алгоритмів засобами корутин та потоків C++	53	Vokhmianin H., Zhulkovskyi O., Zhulkovska I., Katan V., Klym V., Kuznetsov I. Evaluation of the efficiency of the implementation of asynchronous computational algorithms using corutins and C++ flows	53

Гожий О.П., Жебко О.О., Калініна І.О., Ганніченко Т.А. Інтелектуальна система класифікації на основі ансамблевих методів	61	Gozhyj O.P., Zhebko O.O., Kalinina I.O., Hannichenko T.A. Intelligent classification system based on ensemble methods	61
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. Оцінка раціональній номенклатури контролюємих параметрів об'єктів при їх виготовленні, спостереженні та управлінні	76	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. Alternative to mean and least squares methods used in processing the results of scientific and technical experiments	76
Каштан В.Ю., Сергєєва К.Л., Коробко О.В., Іванов Д.В. Пошук та оцінка островів тепла на цифрових космічних знімках	87	Kashtan V.Yu., Sergieieva K.L., Korobko O.V., Ivanov D.V. Search and assessment of urban heat islands on digital satellite images	87
Курганов І.Д. Оптимальне керування стрічковим конвеєром у складі технологічного процесу транспортування рудної маси керуючи натягом стрічки	99	Kurganov I.D. Optimal control of the belt conveyor as part of the technological process of ore mass transportation by controlling the belt tension	99
Поліський Ю.Д. Перетворення у системі залишкових класів числа з однієї системи модулів в іншу	109	Poliskyi Yu.D. Transformation in the system of residual number classes from one system of modules to another	109
Островська К.Ю., Мінаєнко А.С. Дослідження методів машинного навчання для рішення задач медичного профілю	118	Ostrovska K.Yu., Minayenko A.S. Research of machine learning methods for solving the problems of the medical profile	118

Сулема Є.С., Дичка А.І.

Програмна система автоматичної
ідентифікації та розподіленого
зберігання медичних даних
пацієнтів

134

Sulema Ye.S., Dychka A.I.

Software system of automatic iden-
tification and distributed storage of
patient medical data

134

РЕФЕРАТИ

УДК 533.6.013.14 : 629.1.025.3

Сироткіна Н.П., Тернова К.В. **Регресійний аналіз імпульсних характеристик укороченого надзвукового сопла** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(146). – Дніпро, 2023. – С.3 – 9.

Актуальність роботи визначається необхідністю регресійного аналізу імпульсних характеристик в укороченому соплі. Розглянута регресійна модель надзвукового потоку в укороченому соплі з насадком, створена на основі отриманих раніше результатів моделювання в пакеті ANSYS. Ціль роботи – вибір оптимального контуру укороченого сопла з урахуванням геометричних та технологічних параметрів. Аналіз даних проводився на основі програми STATGRAPHICS Plus. Отримані величини впливу кожного прийнятого фактора і їх взаємний вплив на коефіцієнт імпульсу укороченого сопла.

Бібл. 5., іл. 3.

УДК. 629.5.063

Михайленко В.С., Каменєва А.В., Стукалов С.А., Зуй О.М. **Моделювання нейромережевої системи ідентифікації та керування параметрами технічного об'єкта** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(146). – Дніпро, 2023. – С.10 – 24.

Проводиться аналіз ефективності роботи нейромережевої системи управління змістом лужності (РН) у поживній воді парового котла. Інтелектуальна система управління реалізує принцип зворотного проходження похибки через нейроемулятор. Як об'єкт дослідження використовується модель підсистеми продувки водотрубного парового котла. Навчання нейромережевого контролера та нейроемулятора проводилося на моделі САУ з ПІД-регулятором за методикою експертного коригування настроювальних коефіцієнтів: пропорційності, сталої інтегрування та диференціювання на основі аналізу показників якості перехідного процесу. Аналіз перехідних процесів отриманих на основі імітаційного моделювання дозволяє стверджувати, що навчена нейромережева система управління успішно компенсує збурення на широкому діапазоні зміни значень параметрів об'єкта по каналах управління і збурення (імітація зміни парового навантаження).

Бібл.11, іл.13, табл.1.

УДК 004.056

Трофименко О.Г., Дика А.І., Лобода Ю.Г. **Аналіз уразливостей та проблем безпеки вебзастосунків** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(146). – Дніпро, 2023. – С.25 – 37.

Проведено комплексний аналіз уразливостей, методів, інструментів та проблем, з якими стикається тестування безпеки вебзастосунків. Виділено особливості специфіки уразливостей безпеки вебзастосунків. Розглянуто проблеми, з якими стикаються автоматизовані інструменти для тестування веббезпеки.

Бібл. 12.

УДК 62-237: 004.94

Стрельбіцький В.В., Бовнегра Л.В., Павлишко А.В. **Аналіз міцності вил вилочного навантажувача чисельними методами** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(146). – Дніпро, 2023. – С.38 – 45.

Навантажувачі - це промислові силові машини, які називають навантажувачами або вилочними навантажувачами, котрі мають дві вилки. Їх широко використовують на складах, будівельних майданчиках, у морських портах, супермаркетах та ін.. Їх можуть експлуатувати від декількох годин на день до 24 годин на добу, 7 днів на тиждень, як в приміщенні, так і на відкритому повітрі. На продуктивність та надійність навантажувача впливають конструкція та деталі, пов'язані з вилкою, яка відповідає за надійне транспортування вантажу. На сьогодні при дослідженні напруженого стану конструкцій в галузі машинобудування широко використовують чисельні методи розрахунку, а саме моделювання методом скінчених елементів (МСЕ). Аналіз робіт з визначення статичних напружень у конструкціях вилочних навантажувачів з використанням МСЕ показав, що похибка між результатами аналізу і випробувань не перевищила 10%. Напруження у вилах залежать від умов їх кріплення, навантаження і конструкції. У статті виконано аналіз напруженого стану вил вилочного навантажувача за допомогою методу кінцевих елементів у безкоштовному програмному забезпеченні FreeCAD, який є результатом довгострокової активної співпраці між розробниками та користувачами. Безкоштовне програмне забезпечення простіше в обслуговуванні та доступне для більшої кількості людей. Вилка виготовлена з конструкційного матеріалу - сталі 40X. Було встановлено, що напруження у в області округлення кореня вилки є максимальні та складають 128 МПа. Для зменшення напружень було запропоновано збільшити радіус з 25 мм до 35 мм та 45 мм. Проведені чисельні експерименти показали, що при збільшенні радіуса з 25 до 45 мм призводить до зменшення напружень у 1,1...1,15 рази, що узгоджується з теорією базової механіки про те, що концентрація напружень може легко призвести до втомного руйнування конструкції.

Бібл. 15. Іл. 6.

УДК 669.017:621.771

Балаханова Т.В., Кононенко Г.А., Сафронова О.А., Сафронов О.Л., Клинова О.П. **Дослідження трансформації мікроструктури осьових заготовок після прокатування** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(146). – Дніпро, 2023. – С.46 – 52.

Проведено дослідження особливостей структури осьових заготовок зі сталі марки F (AAR M-101-2017 Axles, carbon steel, heat-treated після повздовжнього прокатування на трубопрокатному агрегаті ТПА 5 – 12" з пілігримовими станами за трьома режимами обтиснень (1 режим: Ш 470 → Ш 380 → Ш 260 мм; 2 режим: Ш 470 → Ш 420 → Ш 260 мм; 3 режим: Ш 470 → Ш 260 мм). Визначення особливостей розподілу деформаційного пророблення та формування кінцевої структури після деформування за дослідними режимами БЛЗ Ш470 мм на круг Ш260 мм є метою досліджень. Зразки для дослідження структури відбирали як від вихідної БЛЗ, так і готової чорнової осі по всьому перерізу. Визначено, що рівномірність зеренної структури найвища після застосування режиму №3 (Ш 470 → Ш 260 мм).

Бібл. 6, іл.2, табл. 1.

УДК 004.032.24:519.612.2

Вохмянін Г.Я., Жульковський О.О., Жульковська І.І., Катан В.О., Клим В.Ю., Кузнєцов І.І.

Оцінка ефективності реалізації асинхронних обчислювальних алгоритмів засобами корутин та потоків C++ // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(146). – Дніпро, 2023. – С.53 – 60.

Одним із механізмів підвищення продуктивності обчислень при комп'ютерному моделюванні є корутини – зручний засіб управління асинхронними операціями, введений у стандарт C++20. Метою роботи є підвищення швидкодії обчислювальних алгоритмів за рахунок використання механізму корутин та потоків даних. При застосуванні нового підходу вдалось досягти відносного збільшення швидкості обчислень у 1,94 рази при розмірності матриці 1,54104. Проведено порівняння застосування розробленого асинхронного алгоритму з використанням корутин та розбиттям на два потоки та однопоточного. Для матриць із розмірністю понад 1200 використання двопоточного асинхронного алгоритму гарантовано доцільніше за однопоточний. Таким чином, запропонований спосіб вирішення проблем асинхронного програмування надає більш ефективний та простий механізм управління асинхронними операціями.

Бібл. 11, іл. 1.

Гожий О.П., Жебко О.О., Калініна І.О., Ганніченко Т.А. **Інтелектуальна система класифікації на основі ансамблевих методів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(146). – Дніпро, 2023. – С.61 – 75.

В роботі на основі методів машинного навчання досліджено вирішення завдання класифікації за допомогою дворівневої структури ансамблів моделей. Запропоновано архітектуру інтелектуальної системи класифікації. Для покращення результатів прогнозування застосовано ансамблевий підхід: кілька базових моделей навчались для вирішення однієї і тієї ж проблеми, з подальшим агрегуванням і покращенням отриманих результатів. Для пошуку компромісу між зміщенням та дисперсією, властивих моделям машинного навчання, було використано дворівневу структуру ансамблю. На першому рівні реалізовано ансамбль на основі стекінгу. На другому - на основі бегінгу. Проведено дослідження базових моделей класифікації та ансамблевих моделей на основі стекінгу та бегінгу, а також метрик оцінки ефективності використання базових класифікаторів та моделей першого та другого рівня. Визначено наступні параметри для усіх наведених методів у роботі: точність прогнозування та коефіцієнт помилок, Каппа-статистика, чутливість та специфічність, точність та повнота, F-міра та площею під ROC-кривою. Визначено ефективність ансамблю моделей в порівнянні з кожною базовою моделлю.

Бібл. 26, іл. 1.

УДК 658.52.011.56:389.1/.14

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. **Оцінка раціональної номенклатури контролюємих параметрів об'єктів при їх виготовленні, спостереженні та управлінні** // Системні

технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(146). – Дніпро, 2023. – С.76 – 86.

У статті приведено метод виключення надлишкового параметру (параметрів) із номенклатури контролюємих параметрів об'єктів при їх виготовленні, спостереженні та управлінні. Розроблена програма на мові «Delphi-7», для котрої необхідні такі дані: кількість контролюємих параметрів; значення допусків на параметри, котрі підлягають контролю; середні значення та середні квадратичні відхилення параметрів; види законів розподілу параметрів; попарні коефіцієнти кореляції; допустимі значення ймовірностей помилок контролю. При рішенні задачі використовують кореляційні матриці чи перебір комбінацій параметрів.

Бібл. 8, табл. 1.

УДК 004.9

Каштан В.Ю., Сергєєва К.Л., Коробко О.В., Іванов Д.В. **Пошук та оцінка островів тепла на цифрових космічних знімках** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(146). – Дніпро, 2023. – С.87 – 98.

Останнім часом все більш актуальними стають дослідження теплового забруднення міст, «Міські острови тепла» на основі даних дистанційного зондування Землі. Підвищення теплового фону часто є індикатором інших видів забруднення, тому вивчення його просторової диференціації допомагає оцінити інтенсивність антропогенного впливу на довкілля загалом. В роботі проведений розвиток методу виділення сталих островів тепла урбанізованих територій за часовими рядами даних супутникових зображень. Створено інформаційну технологію виявлення ділянок підвищених температур, що дозволяє на підставі аналізу різночасових карт температури виявляти стабільні у часі ділянки теплового забруднення, потенційно небезпечні для населення прилеглих територій. Виконано побудову карт УНІ міста Дніпро з використанням запропонованої інформаційної технології.

Бібл. 14, іл. 4.

УДК 622: 647.2

Курганов І.Д. **Оптимальне керування стрічковим конвеєром у складі технологічного процесу транспортування рудної маси керуючи натягом стрічки** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(146). – Дніпро, 2023. – С.99 – 108.

Актуальність роботи визначається в дослідженні аварійних ситуацій, які призводять до зупинки конвеєрної лінії, а це пробуксовування приводної станції одного з стрічкових конвеєрів тракту подачі транспортованої рудної маси, що може бути пов'язано з недостатнім натягом стрічки. Ціль роботи - моделювання фрикційної пари як моделі з розподіленими параметрами для подальшого її використання в розробці оптимальної системи автоматичного керування. Отримано теплове поле роботи фрикційної пари для різних режимів роботи приводного барабана досліджуваного конвеєра при керуванні натягом стрічки.

Бібл. 4, іл. 3.

УДК 681.04

Поліський Ю.Д. **Перетворення у системі залишкових класів числа з однієї системи модулів в іншу** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(146). – Дніпро, 2023. – С.109 – 117.

Метою дослідження є аналітичний розгляд системи залишкових класів для реалізації операції перетворення чисел з однієї системи залишкових класів в іншу. Метод. Системний аналіз, теорія чисел і китайська теорема про залишки є інструментами методології дослідження. Метод використовує представлення числа як його залишками, так і в поліадичному коді. Методика базується на визначенні позиційних характеристик для даного модуля на основі отриманих позиційних характеристик для решти модулів вихідної системи з подальшою побудовою на їх основі залишків для модулів шуканої системи. Пропонований спосіб алгоритмічно простий. Результати. Виконано теоретичне обґрунтування розглянутого підходу для отримання ефективного розв'язку операції немодульного перетворення в системі залишкових класів для переходу від представлення числа однією системою модулів до його представлення іншою системою модулів. Показано, що запропонований спосіб забезпечує бажаний результат. На основі запропонованого підходу досягається підвищення ефективності операції перетворення. Наукова новизна. Запропоновано теоретичне обґрунтування представленого підходу до розв'язання операції немодульного перетворення в системі залишкових класів для переходу від представлення числа в одній системі модулів до його представлення в іншій системі модулів. Представляється доцільним застосувати запропонований підхід як перспективний напрямок дослідження складних операцій у системі залишкових класів. Практичне значення. Впливає з важливості теоретичних висновків та отриманих результатів дослідження. Воно базується на тому, що існує достатньо простий та ефективний підхід до вирішення задачі виконання немодульної операції перетворення в системі залишкових класів для переходу від представлення числа в одній системі модулів до його представлення в іншій системі модулів. Розглянуті рішення мають високу швидкість та можуть бути ефективними при розробці модульних обчислювальних структур для перспективних інформаційних технологій.

Бібл. 3.

УДК 004.4:681.5

Островська К.Ю., Мінаєнко А.С. **Дослідження методів машинного навчання для рішення задач медичного профілю** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(146). – Дніпро, 2023. – С.118 – 133.

Робота присвячена дослідженню методів машинного навчання для рішення задач медичного профілю. В результаті дослідження вирішено такі завдання: зроблено аналіз літератури щодо застосування методів машинного навчання до захворювань сечостатевої системи; розроблено програму для вилучення в напівавтоматичному режимі необхідної інформації з виписок; проаналізовано бібліотеки мови Python та частину методів машинного навчання; проведено первинний аналіз та передобробка даних; застосовано методи класифікації, відбору ознак та заповнення пропущених значень; проаналізовано одержані результати та виконано обґрунтування результатів дослідження у предметній галузі.

Бібл. 19, іл. 22., табл.5.

УДК 004.9:004.75

Сулема Є.С., Дичка А.І. **Програмна система автоматичної ідентифікації та розподіленого зберігання медичних даних пацієнтів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3(146). – Дніпро, 2023. – С.134 – 148.

Запропоновано архітектуру програмної системи, у якій на основі принципів розподіленості, анонімізації та володіння даними забезпечується можливість для пацієнта надавати доступ медичному персоналу до власних персональних та медичних даних шляхом зчитування багатоколірного заводостійкого штрихового коду з одного смартфона (пацієнта) камерою іншого смартфона (медпрацівника). Це дозволяє підвищити якість медичного обслуговування та посилити захист медичних даних пацієнта. Штрихкодний спосіб передачі та оброблення даних забезпечує захищену електронну взаємодію пацієнта з лікарем з гарантією високої надійності та конфіденційності обміну даними.

Бібл.14, іл.7.

UDK 533.6.013.14 : 629.1.025.3

Syrotkina N.P., Ternova K.V. **Regression analysis of impulse characteristics shorted supersonic nozzle** // System technologies. N 3(146) - Dnipro, 2023.- P.3 – 9.

The relevance of this work is determined by the need of regression analysis of impulse characteristics in a shortened nozzle. The regression model of a supersonic flow in a shortened nozzle with a tip considered in this paper was created on the basis of the simulation results obtained earlier in the ANSYS package. The purpose of the work is to select the optimal contour of a shortened nozzle, taking into account geometric and technological parameters. The analysis of the data was carried out on the basis of the STATGRAPHICS Plus program. The influence values of each accepted factor and their mutual influence on the impulse coefficient of a shortened nozzle are obtained.

Bibl. 5., ill. 3.

UDC 629.5.063

Mykhailenko V., Kamienieva A., Stukalov S., Zui O. **Modeling of a neural network-based system for identification and control of technical object parameters** // System technologies. N 3(146) - Dnipro, 2023.- P.10 – 24.

The article analyzes the effectiveness of a neural network control system for maintaining the pH level in the feedwater of a steam boiler. An intelligent control system implements the principle of reverse error propagation through a neural emulator. The subsystem model of steam boiler water tube blowing was used as the research object. The neural network controller and neural emulator were trained on a control system model with a PID controller using the expert correction methodology of tuning coefficients: proportionality, integration constant, and differentiation based on the analysis of transient process quality indicators. The analysis of the transient processes obtained from simulation modeling allows us to state that the trained neural network control system successfully compensates for disturbances over a wide range of changes in the object's parameter values via control channels and disturbances (simulating changes in steam load).

Ref.11, fig.13, table.1.

UDC 004.056

Trofymenko O., Dyka A., Loboda Yu. **Analysis of vulnerabilities and security issues of web applications** // System technologies. N 3(146) - Dnipro, 2023.- P.25 – 37.

A comprehensive analysis of vulnerabilities, methods, tools and problems faced by web application security testing is carried out. The specific features of web application security vulnerabilities are highlighted. The problems faced by automated security testing tools are considered.

Bible 12.

UDK 62-237: 004.94

Strelbitskyi V.V., Bovnegr L.V., Pavlyshko A.V. **Analysis of strength of a fork of the forklift by numerical methods** // System technologies. N 3(146) - Dnipro, 2023.- P.38 – 45.

In this paper, by calculating the maximum normal stress of the section, the force situation and allowable stress of the fork are analyzed. The fork are made of structural material is 40Cr steel. The output values of the static study consist in establishing the distribution of equivalent unitary stresses (stress state) according to the von Mises criterion. The maximum stress of the structure is 128 MPa, which is does not exceed the allowable. Then in order to enhance the structural strength of the weak part, the measures of gradually increasing the fillet radius of the fork root were proposed, and the radius were selected as 35mm and 45mm, the weight of the forklift load was still 0,5t. Numerical experiments have shown that by increasing the radius from 25 to 45 mm, stresses decrease by 1.1...1.15 times, which is consistent with the theory of basic mechanics that stress concentration can easily lead to fatigue failure of the structure. Both numerical calculations and visual analysis showed consistency, with stress concentrations observed at the fork neck, demonstrating the accuracy of the established finite element model.

Ref.15. Fig.6.

UDC 669.017:621.771

Balakhanova T.V., Kononenko G.A., Safronova O.A., Safronov O.L., Klynova O.P. **Analysis of the transformation of the microstructure of axial billets after rolling** // System technologies. N 3(146) - Dnipro, 2023.- P.46 – 52.

A study of the features of the structure of axle blanks made of steel grade F (AAR M-101-2017 Axles, carbon steel, heat-treated) after longitudinal rolling on a TPA 5-12" pipe rolling unit with pilgrim mills in three crimping modes (1 mode: $\text{Ш } 470 \rightarrow \text{Ш } 380 \rightarrow \text{Ш } 260$ mm; 2nd mode: $\text{Ш } 470 \rightarrow \text{Ш } 420 \rightarrow \text{Ш } 260$ mm; 3rd mode: $\text{Ш } 470 \rightarrow \text{Ш } 260$ mm). Determination of the features of the distribution of deformation work and the formation of the final structure after deformation according to the experimental modes of BLZ $\text{Ш } 470$ mm per circle $\text{Ш } 260$ mm is the goal of the research. Samples for structure research were taken both from the original BLZ and the finished draft axis along the entire cross-section.

Bibl. 6, il. 2, table. 1.

UDC 004.032.24:519.612.2

Vokhmianin H., Zhulkovskiy O., Zhulkovska I., Katan V., Klym V., Kuznetsov I. **Evaluation of the efficiency of the implementation of asynchronous computational algorithms using coroutines and C++ flows** // System technologies. N 3(146) - Dnipro, 2023.- P.53 – 60.

Coroutines is a convenient tool for managing asynchronous operations introduced in the C++20 standard. The purpose of this research is to improve the performance of computational algorithms – the basis of computer models – by using the coroutine mechanism and data threads. Due to use new approach, it was possible to achieve a relative increase in computing speed by a factor of 1.94 times for a matrix dimension of 1.54×10^4 . A comparison of the application of the developed asynchronous algorithm using coroutines with splitting into two threads and one thread was made. For matrices with dimensions over 1200, the use of a two-threaded asynchronous algorithm is more expedient than a single-threaded one. A new method of solving asynchronous programming problems provides a more efficient and simple mechanism for managing asynchronous operations

Ref. 11, im. 1.

UDC 004.85 (075.8)

Gozhyj O.P., Zhebko O.O., Kalinina I.O., Hannichenko T.A. **Intelligent classification system based on ensemble methods** // System technologies. N 3(146) - Dnipro, 2023.- P.61 – 75.

In the paper, based on machine learning methods, the solution of the classification task was investigated using a two-level structure of ensembles of models. To improve forecasting results, an ensemble approach was used: several basic models were trained to solve the same problem, with subsequent aggregation and improvement of the obtained results. The problem of classification was studied. The architecture of the intelligent classification system is proposed. The system consists of the following components: a subsystem of preprocessing and data analysis, a subsystem of data distribution, a subsystem of building basic models, a subsystem of building and evaluating ensembles of models. A two-level ensemble structure was used to find a compromise between bias and variance inherent in machine learning models. At the first level, an ensemble based on stacking is implemented using a logistic regression model as a metamodel. The predictions that are generated by the underlying models are used as input for training in the first layer. The following basic models of the first layer were chosen: decision trees (DecisionTree), naive Bayesian classifier (NB), quadratic discriminant analysis (QDA), logistic regression (LR), support vector method (SVM), random forest model (RF). The bagging method based on the Bagged CART algorithm was used in the second layer. The algorithm creates N regression trees using M initial training sets and averages the resulting predictions. As the basic models of the second layer, the following were chosen: the first-level model (Stacking LR), the model of artificial neural networks (ANN); the linear discriminant analysis (LDA) model and the nearest neighbor (KNN) model. A study of basic classification models and ensemble models based on stacking and bagging, as well as metrics for evaluating the effectiveness of the use of basic classifiers and models of the first and second level, was conducted. The following parameters were determined for all the methods in the work: prediction accuracy and error rate, Kappa statistic, sensitivity and specificity, accuracy and completeness, F-measure and area under the ROC curve. The advantages and effectiveness of the ensemble of models in comparison with each basic model are determined.

Bibl. 26, il. 1, table. 1.

UDC 658.52.011.56:389.1/.14

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. **Alternative to mean and least squares methods used in processing the results of scientific and technical experiments** // System technologies. N 3(146) - Dnipro, 2023.- P.76 – 86.

The nomenclature of controlled parameters and norms of measurement accuracy determines the reliability of control and its laboriousness. On average, the labor-intensiveness of control is about 10% of the total labor-intensiveness of manufacturing objects, and in a number of industries it is much higher (aerospace engineering). The simplest task in determining

a rational nomenclature of controlled parameters of objects is the exclusion of excessive parameters, while it is necessary to determine the probability that the deviations of some X2 parameter within the specified tolerances are the same as the deviations of the X1 parameter within its specified tolerances. At the same time, inequalities are defined that determine the smallest value of this probability. The general principle of solving this problem is the determination of conditional probabilities (if two parameters are considered) $P_{P11, P12}$, or $P_{P21, P22}$. At the same time, if the obtained values: P_{11}, P_{12} , are more likely than (or equal to) the permissible value of R_{dop} , then it is advisable to control only parameter X1, and exclude X2 from the nomenclature of parameters. If: P_{21}, P_{22} , are greater than (or equal to) the permissible value of R_{dop} , then X1 is turned off. An example of the exclusion of a redundant control parameter is given. The method can be generalized for any number of parameters, for which it is necessary to use correlation matrices or a simple enumeration of parameter combinations. A computer program has been developed that can be used if the following information is available: 1) the number of controlled parameters (n); 2) values of tolerances (X_{ni}, X_{vi}), which parameters are subject to control; 3) numerical characteristics of distributions of parameter values within the specified tolerances - the average value of \bar{X}_i and the average squared deviation σ_{Xi} ; 4) types of distribution laws of parameter values; 5) data on correlations between parameters and values of pairwise correlation coefficients (r_{ij}); 6) the value of the probabilities of control errors P_{12}, P_{21} (with two parameters). Calculations should be adjusted as statistical data accumulate.

Bibl. 8, il. 0, table. 1.

UDC 004.9

Kashtan V.Yu., Sergieieva K.L., Korobko O.V., Ivanov D.V. **Search and assessment of urban heat islands on digital satellite images** // System technologies. N 3(146) - Dnipro, 2023.- P.87 – 98.

Recently, studies of cities' thermal pollution - Urban Heat Islands based on Earth remote sensing data are becoming more and more relevant. Increasing the thermal background is often an indicator of other types of pollution, so the study of its spatial differentiation helps to assess the intensity of anthropogenic impact on the environment in general. The method of identifying time-stable heat islands of urban areas based on time series of satellite image data is developed. Information technology for detecting areas of high temperatures is created. It allows to identify of heat pollution areas stable over time, potentially dangerous for the population of the surrounding areas based on different-time temperature maps analysis. UHI maps of the Dnipro city have been generated using the proposed information technology.

Ref. 14, fig. 4.

UDC 622: 647.2

Kurganov I.D. **Optimal control of the belt conveyor as part of the technological process of ore mass transportation by controlling the belt tension** // System technologies. N 3(146) - Dnipro, 2023.- P.99 – 108.

The relevance of the work is determined by the study of emergency situations that lead to the stoppage of the conveyor line, which is the slippage of the drive station of one of the belt conveyors of the supply path of the transported ore mass, which may be associated with insufficient belt tension. The aim of the work is to model the friction pair as a model with distributed parameters for its further use in the development of an optimal automatic control system. The thermal field of operation of the friction pair was obtained for different modes of operation of the drive drum of the investigated conveyor when controlling the belt tension.

Bibl. 4, ill. 3.

UDC 681.04

Poliskyi Yu.D. **Transformation in the system of residual number classes from one system of modules to another** // System technologies. N 3(146) - Dnipro, 2023.- P.109 – 117.

The purpose of the study is an analytical consideration of the system of residual classes for the implementation of the operation of converting numbers from one system of residual classes to another. Method. System analysis, number theory, and the Chinese remainder theorem are tools of the research methodology. The method uses the representation of the number both by its remainders and in the polyadic code. The methodology is based on determining the positional characteristics for this module on the basis of the received positional characteristics for the remaining modules of the original system, with the subsequent construction on their basis of the residuals for the modules of the sought system. The proposed method is algorithmically simple. The results. The theoretical substantiation of the considered approach to obtain an effective solution of the non-modular transformation operation in the system of residual classes for the transition from the representation of a number by one system of modules to its representation by another system of modules is performed. It is shown that the proposed method provides the desired result. On the basis of the proposed approach, an increase in the performance of the conversion operation is achieved. Scientific novelty. The theoretical justification of the presented approach to the solution of the non-modular transformation operation in the system of residual classes for the transition from the representation of a number in one system of modules to its representation in another system of modules is proposed. It seems appropriate to apply the proposed approach as a prospective direction of research of complex operations in the system of residual classes. Practical significance. It follows from the importance of theoretical conclusions and obtained research results. It is based on the fact that there is a reasonably simple and effective approach to solving the problem of performing a non-modular conversion operation in the system of residual classes for the transition from the representation of a number in one system of modules to its representation in another system of modules. The considered solutions have high speed and

can be effective in the development of modular computing structures for promising information technologies.

Bibl. 3.

UDC 004.4:681.5

Ostrovska K.Yu., Minayenko A.S. **Research of machine learning methods for solving the problems of the medical profile** // System technologies. N 3(146) - Dnipro, 2023.- P.118 – 133.

The work is devoted to the study of machine learning methods for solving medical problems. The purpose of the work is to analyze machine learning methods to increase the accuracy and reduce the time of diagnosis of diseases of the genitourinary system in children. The object of research is machine learning methods. The subject of research is a classifier of diseases of the genitourinary system of patients of the Dnipropetrovsk Regional Children's Clinical Hospital "Dnipropetrovsk Regional Council". As a result of the study, the following tasks were solved: an analysis of the literature on the application of machine learning methods to diseases of the genitourinary system was made; a program was developed for extracting the necessary information on statements in a semi-automatic mode; Python language libraries and part of machine learning methods are analyzed; primary analysis and processing of data was carried out; applied methods of classification, selection of signs and filling in missing values; the obtained results are analyzed and the substantiation of the research results in the subject area is carried out.

Bibl. 19, ill. 22.

UDC 004.9:004.75

Sulema Ye.S., Dychka A.I. **Software system of automatic identification and distributed storage of patient medical data** // System technologies. N 3(146) - Dnipro, 2023.- P.134 – 148.

The architecture of the software system is proposed, in which, based on the principles of distribution, anonymization, and data ownership, it is possible for a patient to provide access to medical personnel to their own personal and medical data by reading a multi-color interference-resistant barcode from one smartphone (patient) with the camera of another smartphone (medic). This makes it possible to improve the quality of medical care and strengthen the protection of the patient's medical data. The barcode method of data transmission and processing provides secure electronic interaction between the patient and the doctor with a guarantee of high reliability and confidentiality of data exchange.

Ref. 14, il.7.

Системні технології
ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Випуск 3 (146)

Головний редактор: к.т.н., доц. Т.В. Селівьорстова

Технічний редактор та секретар збірки: к.т.н., доц. К.Ю. Островська

Здано до набору 24.04.2023. Підписано до друку 28.04.2023.

Формат 60x84 1/16. Друк - різнограф. Папір типограф.

Умов. друк арк. – 11,64. Обл.–видавн. арк. – 10,188.

Тираж 300 прим. Замовл. – 03/23

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

Гнатюшенко Вікторія Володимирівна

(*вчений секретар*)

професор, доктор технічних наук

Гнатюшенко 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. Сташці, Польща

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту»Україна

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна