

ISSN 2786-6254 (Print)  
ISSN 2786-6262 (Online)

Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет

Заснований  
у 1997 р.

Свідоцтво про державну реєстрацію  
друкованого засобу масової інформації  
Серія КВ № 24766-14706Р від 25 березня 2021 р.

## Computer Science and Applied Mathematics

**Адреса редакції:**  
вул. Університетська 66, корп. 1, ауд. 21(б),  
м. Запоріжжя, Україна, 69060

**Телефон**  
для довідок:  
+38 066 53 57 687

**№ 2, 2024**



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2024

Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet вченою радою ЗНУ (протокол засідання № 6 від 24.12.2024 р.)

На підставі Наказу Міністерства освіти і науки України № 886 від 02.07.2020 р. (додаток 4) журнал включено до Переліку наукових фахових видань України категорії «Б» у галузях знань 11 Математика та статистика і 12 Інформаційні технології (113 – Прикладна математика, 121 – Інженерія програмного забезпечення, 122 – Комп'ютерні науки).

До 25 березня 2021 р. журнал виходив під назвою «Вісник Запорізького національного університету. Фізико-математичні науки».

У зв'язку зі зміною назви журналу було внесено відповідні зміни до Переліку наукових фахових видань України на підставі Наказу Міністерства освіти та науки України № 735 від 29.06.2021 р. (додаток 3).

Журнал індексується в міжнародній наукометричній базі даних Index Copernicus

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

#### РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Гоменюк С. І.	–	доктор технічних наук, професор, головний редактор (Україна)
Гребенюк С. М.	–	доктор технічних наук, професор (Україна)
Гришак В. З.	–	доктор технічних наук, професор (Україна)
Єрмолаєв В. А.	–	кандидат фізико-математичних наук, доцент (Україна)
Кеберле Н. Г.	–	кандидат технічних наук, доцент (Україна)
Клименко М. І.	–	кандидат фізико-математичних наук, доцент (Україна)
Козін І. В.	–	доктор фізико-математичних наук, професор (Україна)
Кудін О. В.	–	кандидат фізико-математичних наук, доцент (Україна)
Панасенко Є. В.	–	кандидат фізико-математичних наук, доцент (Україна)
Стеганцев Є. В.	–	кандидат фізико-математичних наук, доцент (Україна)
Чопоров С. В.	–	доктор технічних наук, професор (Україна)
Шило Г. М.	–	доктор технічних наук, доцент (Україна)
Breslavsky I.	–	PhD in Mechanics, Docent (Канада)
Djakon R.	–	Doctor of Science in Engineering, Professor, Academician (Латвія)
Gerasimov T.	–	PhD in Mathematics, Docent (Німеччина)
Kolakowski Z.	–	Doctor of Science in Engineering, Professor (Польща)
Нарзуллаєв У. Х.	–	кандидат фізико-математичних наук, доцент (Узбекистан)
Швидка С. П.	–	кандидат фізико-математичних наук, доцент (Словаччина)

# ЗМІСТ

## РОЗДІЛ I. ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

<b>Клещков О. М., Лобода В. В.</b> <i>АНАЛІТИЧНИЙ ТА ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ МІКРОТРІЩИНИ ВЗДОВЖ ЖОРСТКО ЗАКРІПЛЕНОГО КРАЮ ТОНКОЇ НАКЛАДКИ</i> .....	5
--	---

## РОЗДІЛ II. ІНЖЕНЕРІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

<b>Шафар А. А.</b> <i>НЕЙРО-НЕЧІТКА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ТА ВИБОРУ МІСЦЯ ПРИЗНАЧЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ЦІЛЬОВИХ ПОТРЕБ ТУРИСТА</i> .....	13
--	----

## РОЗДІЛ III. КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

<b>Бабич Г. О., Шило Г. М.</b> <i>ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО КЕРУВАННЯ У СИСТЕМАХ ЗАПАЛЮВАННЯ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ</i> .....	23
<b>Виганяйло Я. М., Шило Г. М.</b> <i>ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ НАЯВНОСТІ ГОРІННЯ ПАЛИВО-ПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ У ФОРСАЖНІЙ КАМЕРІ ЗГОРЯННЯ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ</i> .....	31
<b>Грищак В. З., Грищак Д. В., Д'яченко Н. М., Купріков В. О.</b> <i>БІФУРКАЦІЙНІ СТАНИ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ЗАКРИТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТРИШАРОВИХ СКЛАДЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ</i> .....	39
<b>Драєвський Д. С., Мухін В. В.</b> <i>РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ ІОТ СИСТЕМИ ВІДДАЛЕНОГО УПРАВЛІННЯ ПРИСТРОЯМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАТФОРМИ ESP32</i> .....	54
<b>Melnychuk O. S., Lobur M. V., Sviridova T. V.</b> <i>PROBLEMS OF MACHINE LEARNING IMPLEMENTATION ON MODERN EDGE DEVICES</i> .....	62
<b>Молчанова М. О., Бармак О. В.</b> <i>МЕТОД НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО ВИЯВЛЕННЯ ПРИЙОМІВ ПРОПАГАНДИ ЗА МАРКЕРАМИ З ВІЗУАЛЬНОЮ ІНТЕРПРЕТАЦІЄЮ ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ</i> .....	72
<b>Собко О. В., Бармак О. В.</b> <i>МЕТОД АНАЛІЗУ ТА ФОРМУВАННЯ РЕПРЕЗЕНТАТИВНИХ ВИБІРОК ТЕКСТОВИХ ДАНИХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ</i> ....	83
<b>Шило Г. М., Добринін І. С., Матвіїшина Н. В.</b> <i>АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО СТВОРЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЮ БЕЗПЕКОЮ ДЛЯ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ТА НАУКОВИХ УСТАНОВ</i> .....	93
<b>Шило Г. М., Лебедева-Дичко А. С.</b> <i>АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ТА ФІЛЬТРАЦІЯ ШУМІВ У ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ</i> .....	102

# CONTENTS

## SECTION I. APPLIED MATHEMATICS

<b>Kletskov O. M., Loboda V. V.</b> <i>ANALYTICAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF A MICROCRACK ALONG THE RIGIDLY FIXED EDGE OF A THIN OVERLAY</i> .....	5
--	---

## SECTION II. SOFTWARE ENGINEERING

<b>Shafar A. A.</b> <i>A NEURO-FUSSY MODEL FOR DESTINATION EVALUATION AND CHOICE TAKING INTO ACCOUNT THE TARGET NEEDS OF THE TOURIST</i> .....	13
---	----

## SECTION III. COMPUTER SCIENCES

<b>Babich G. O., Shilo G. M.</b> <i>PERSPECTIVES FOR THE APPLICATION OF MICROPROCESSOR CONTROL IN IGNITION SYSTEMS OF GAS TURBINE ENGINE</i> .....	23
<b>Vyhaniailo Ya. M., Shilo G. M.</b> <i>RESEARCH OF METHODS AND ALGORITHMS FOR AUTOMATIC DETECTION OF THE PRESENCE OF COMBUSTION OF THE FUEL-AIR MIXTURE IN THE AFTERBURNER COMBUSTION CHAMBER OF GAS TURBINE ENGINES</i> .....	31
<b>Gristchak V. Z., Hryshchak D. V., Dyachenko N. M., Kuprikov V. O.</b> <i>BIFURCATION STATES AND VISUALIZATION OF POST-CRITICAL DEFORMATION OF THREE-LAYER COMPOSITE STRUCTURES</i> .....	39
<b>Draevskii D. S., Mukhin V.V.</b> <i>DEVELOPMENT OF IOT ARCHITECTURE OF REMOTE CONTROL SYSTEM OF DEVICES USING THE ESP32 PLATFORM</i> .....	54
<b>Melnychuk O. S., Lobur M. V., Sviridova T. V.</b> <i>PROBLEMS OF MACHINE LEARNING IMPLEMENTATION ON MODERN EDGE DEVICES</i> .....	62
<b>Molchanova M. O., Barmak O. V.</b> <i>METHOD OF NEURAL NETWORK DETECTING OF PROPAGANDA TECHNIQUES BY MARKERS WITH VISUAL INTERPRETATION OF DECISIONS MADE</i> .....	72
<b>Sobko O. V., Barmak O. V.</b> <i>METHOD OF ANALYSIS AND FORMATION OF REPRESENTATIVE SETS OF TEXT DATA USING MACHINE LEARNING MODELS</i> .....	83
<b>Shilo G. M., Dobrynin I. S., Matviyishyna N. V.</b> <i>ANALYSIS OF APPROACHES TO CREATING INFORMATION SECURITY MANAGEMENT SYSTEMS FOR HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS AND RESEARCH ESTABLISHMENTS</i> .....	93
<b>Shilo G. M., Lebedieva-Dychko A. S.</b> <i>ANALYSIS OF POSITIONING ACCURACY USING SATELLITE SYSTEMS AND NOISE FILTERING IN INDUSTRIAL ENVIRONMENTS</i> .....	102

# РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

УДК 539.3

DOI <https://doi.org/10.26661/2786-6254-2024-2-01>

## АНАЛІТИЧНИЙ ТА ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ МІКРОТРІЩИНИ ВЗДОВЖ ЖОРСТКО ЗАКРІПЛЕНОГО КРАЮ ТОНКОЇ НАКЛАДКИ

**Клєцков О. М.**

*аспірант*

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара*

*пр. Науки, 72, Дніпро, Україна*

*orcid.org/0000-0003-2587-4647*

*alex.kl87@i.ua*

**Лобода В. В.**

*доктор фізико-математичних наук, професор,*

*завідувач кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки*

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара*

*пр. Науки, 72, Дніпро, Україна*

*orcid.org/0000-0002-0432-629X*

*lobvv@ua.fm*

**Ключові слова:** *розкриття тріщини, швидкість звільнення енергії, товщина накладки, напруження, деформація.*

У статті розглянуто математичне моделювання механічної поведінки біматеріальних систем з мікротріщинами, що виникають внаслідок навантажень. Основна увага приділяється отриманню співвідношень для розподілу напружень, розкриття тріщини та швидкості звільнення енергії при різних товщинах накладки та типах навантажень.

Зокрема, встановлено, що при товщині накладки більше 5 мкм результати розкриття тріщини та розподілу напружень практично не відрізняються від відповідних результатів для півплощини. Це означає, що товсті накладки ефективно розподіляють навантаження, мінімізуючи локальні деформації. Водночас при товщині накладки менше 0,6 мкм спостерігається суттєва зміна поведінки системи, яка наближається до границі використання лінійної теорії пружності. Така поведінка може призвести до невільного прогнозування тріщиноутворення та руйнування матеріалу, якщо не враховувати ці особливості.

Розглянуто вплив зосередженої сили на розкриття тріщини. Аналіз проведено при різних значеннях сили та різних точках її прикладання. Виявлено, що збільшення зосередженої сили значно зменшує розкриття тріщини, а її подальше збільшення може призвести до повного закриття тріщини. Зміщення точки прикладання сили від центру тріщини до її краю також впливає на розкриття: максимальне зменшення спостерігається при прикладанні сили через центр тріщини, тоді як при зміщенні точки прикладання за межі тріщини вплив стає незначним.

Отримані результати дослідження свідчать про успішність застосування аналітичних методів для аналізу систем з мікротріщинами. Чисельна ілюстрація розв'язку, проведена для мікротріщини довжиною 2 мкм при різних товщинах накладки, дозволила виявити важливі закономірності в розподілі напружень та розкритті тріщини. Порівняння аналітичних і чисельних результатів показало їх високу узгодженість, що підтверджує надійність обраних методик.

Отримані висновки надають важливу інформацію для розробки нових моделей руйнування біматеріальних систем з мікротріщинами. Вони підкреслюють необхідність подальших досліджень у цьому напрямку з метою поліпшення прогнозування поведінки таких систем під навантаженням та розробки ефективних методів запобігання їх руйнуванню.

## ANALYTICAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF A MICROCRACK ALONG THE RIGIDLY FIXED EDGE OF A THIN OVERLAY

**Kletskov O. M.**

*Postgraduate Student*

*Oles Honchar Dnipro National University*

*Nauki Ave., 72, Dnipro, Ukraine*

*orcid.org/0000-0003-2587-4647*

*alex.kl87@i.ua*

**Loboda V. V.**

*Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,*

*Head of the Department of Theoretical and Computer Mechanics*

*Oles Honchar Dnipro National University*

*Nauki Ave., 72, Dnipro, Ukraine*

*orcid.org/0000-0002-0432-629X*

*lobvv@ua.fm*

**Key words:** *crack opening,  
energy release rate, overlay  
thickness, stress, deformation.*

The article examines the mathematical modeling of the mechanical behavior of bimaterial systems with microcracks arising from loading. The main focus is on deriving relationships for stress distribution, crack opening, and energy release rate at different overlay thicknesses and loading conditions.

In particular, it has been established that for overlay thicknesses greater than 5 microns, the results of crack opening and stress distribution are practically indistinguishable from the corresponding results for a half-plane. This indicates that thick overlays effectively distribute the load, minimizing local deformations. However, for overlay thicknesses less than 0.6 microns, a significant change in the system's behavior is observed, approaching the limit of linear elasticity theory utilization. Such behavior may lead to inaccurate predictions of crack formation and material failure if these peculiarities are not considered.

The influence of concentrated force on crack opening has been investigated. The analysis was conducted at various force magnitudes and different application points. It was found that increasing the concentrated force significantly reduces crack opening, and further increase may lead to complete crack closure. Additionally, the displacement of the force application point from the crack center to its edge also affects crack opening: maximum reduction is observed when the force is applied through the crack center, whereas displacement beyond the crack's boundaries has a negligible effect.

The obtained research results demonstrate the effectiveness of applying analytical methods to analyze systems with microcracks. Numerical illustration of the solution, conducted for a 2-micron microcrack at various overlay thicknesses, revealed important patterns in stress distribution and crack opening. Comparison of analytical and numerical results showed their high consistency, confirming the reliability of the chosen methodologies.

The conclusions drawn provide important information for the development of new models for the failure of bimaterial systems with microcracks. They underscore the need for further research in this direction to improve predictions of such systems' behavior under loading and to develop effective methods to prevent their failure.

**Вступ.** У сучасному світі, де технології постійно розвиваються, роль тонких плівок у захисті конструкцій від негативних факторів зовнішнього середовища набуває все більшої важливості. Від підвищення стійкості до збільшення ефективності – вони стають невід’ємною частиною сучасних технологій. Однак, при всій їхній корисності, виникає проблема: взаємодія між цими плівками та основним матеріалом не завжди є ідеальною. Це може призводити до появи дефектів, які, у свою чергу, загрожують цілісності конструкцій. Особливо важливо вивчення тріщин, які утворюються між тонкою плівкою та матрицею основного матеріалу. Ця проблема залишається недостатньо вивченою та вимагає подальших досліджень. Тому аналіз мікротріщин вздовж жорстко закріпленого краю тонкої накладки стає не лише актуальною, але й практично важливою задачею.

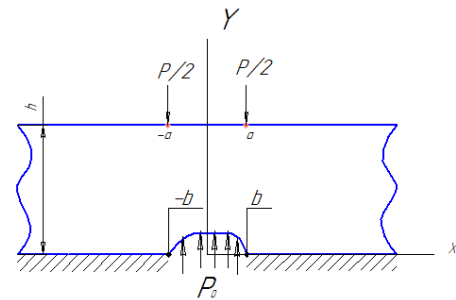
Цей аналіз може відкрити нові можливості для розуміння процесів, які відбуваються на мікrorівні, та допомогти вдосконалити виробу та технології, що базуються на використанні тонких плівок. Розуміння природи та механізмів утворення мікротріщин в цьому контексті відкриває шлях до розробки нових методів запобігання їх появи та подальшому удосконаленню захисних систем. Дослідження цієї проблеми має потенціал стати важливим кроком у забезпеченні стабільності та надійності конструкцій, що використовують тонкі плівки. Врахування взаємодії між тонкими плівками та базовим матеріалом важливо не лише для підвищення стійкості конструкцій, але й для оптимізації виробничих процесів та витрат матеріалів.

Отже, дослідження аналізу мікротріщин вздовж жорстко закріпленого краю тонкої накладки відкриває широкі перспективи для вдосконалення інженерних рішень, забезпечуючи більшу надійність, стійкість та ефективність майбутніх конструкцій.

Аналізу тріщини між двома матеріалами присвячена значна кількість робіт, серед яких можна відзначити публікації останніх років [1–5], тематика яких пов’язана з різними типами напружено-деформованого стану, різними матеріалами, навантаженням і геометрією тріщин. Спеціальної уваги заслуговують дослідження тріщин в однорідній полосі і між різнорідними полосами, яким присвячені роботи [6–9]. Зокрема, в роботі [6] проаналізовано напружено-деформівний стан трьох різнорідних матеріалів з внутрішніми та міжфазними тріщинами. Дослідженню тріщини в неоднорідному середовищі з постійним коефіцієнтом Пуассона і експоненціально змінним модулем Юнга присвячена робота [7], а в роботі [8] досліджено випадок, коли механічні характеристики одного з матеріалів є неоднорідними в зоні взає-

модії. В роботі [9] розглянута центральна тріщина в нескінченній полосі під дією внутрішнього тиску і зосереджених сил на сторонах полоси. Сформульоване сингулярне інтегральне рівняння, для якого побудований чисельний розв’язок. Слід відзначити, що вказані вище дослідження стосуються внутрішніх та міжфазних макротріщин. Але останнім часом значна увага приділяється дослідженню мікротріщин, які завжди присутні в досліджуваних об’єктах і часто є причиною їх руйнувань [10]. В даній роботі якраз і розглядається мікротріщина вздовж жорстко закріпленого краю тонкої накладки, яка знаходиться під дією комбінованого навантаження.

**Постановка задачі.** Розглянемо задачу плоскої деформації мікротріщини  $|x| \leq b$ , яка розташована вздовж жорстко закріпленого краю (при  $y=0$ ) ізотропного, лінійно пружного, нескінченного шару тонкої накладки товщини  $h$ . Тріщина вважається відкритою з рівномірним внутрішнім тиском  $p_0$  на її поверхню. На границю шару в точках  $(\pm a, +h)$  симетрично діє пара стискальних/розтягувальних зосереджених сил  $P/2$  (рис. 1).



**Рис. 1. Геометрія і навантаження задачі**

Для вирішення цієї задачі потрібно розв’язати змішану крайову задачу, яка описується системою диференціальних рівнянь другого порядку у частинних похідних

$$\mu \Delta^2 u(x, y) + \frac{2\mu}{\kappa - 1} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} \right) = 0, \quad (1)$$

$$\mu \Delta^2 v(x, y) + \frac{2\mu}{\kappa - 1} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} \right) = 0, \quad (2)$$

з крайовими умовами, які завдяки симетрії можна записати у вигляді:

$$\tau_{xy}(x, 0) = 0, \quad 0 \leq x \leq b, \quad (3)$$

$$\tau_{xy}(x, h) = 0, \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad (4)$$

$$\sigma_y(x, h) = \frac{P}{2} \delta(x - a), \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad (5)$$

$$\frac{\partial v(x, 0)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u(x, 0)}{\partial x} = 0, \quad b \leq x \leq \infty \quad (6)$$

$$\sigma_y(x, 0) = -p_0, \quad 0 \leq x < b, \quad (7)$$

де  $\kappa = \begin{cases} 3 - 4\nu & \text{для плоскої деформації} \\ \frac{3 - \nu}{1 + \nu} & \text{для плоского напруженого стану} \end{cases}$ ,  
 $\mu$  і  $\nu$  – модуль зсуву і коефіцієнт Пуассона, відповідно.

Метод розв'язання проблеми. Застосовуючи до рівнянь (1), (2) інтегральні перетворення Фур'є

$$\bar{u}(\alpha, y) = \int_0^\infty u(x, y) \sin(\alpha x) dx,$$

$$\bar{v}(\alpha, y) = \int_0^\infty v(x, y) \cos(\alpha x) dx,$$

отримуємо систему звичайних диференціальних рівнянь. Знаходячи загальний розв'язок цієї системи і застосовуючи до нього обернене перетворення Фур'є

$$u(x, y) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \bar{u}(\alpha, y) \sin(\alpha x) d\alpha,$$

$$v(x, y) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \bar{v}(\alpha, y) \cos(\alpha x) d\alpha,$$

отримуємо

$$u(x, y) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty [(A + By)e^{-\alpha y} + (C + Dy)e^{\alpha y}] \sin(\alpha x) d\alpha, \quad (8)$$

$$v(x, y) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \left[ A + \left(\frac{k}{\alpha} + y\right) B \right] e^{-\alpha y} + \left[ -C + \left(\frac{k}{\alpha} - y\right) D \right] e^{\alpha y} \cos(\alpha x) d\alpha, \quad (9)$$

де  $A, B, C$  і  $D$  є невідомі константи, які можуть бути знайдені із граничних умов (3)-(6) при  $y = h$  и  $y = 0$  відповідно.

Згідно до закону Гука необхідні компоненти тензора напружень обчислюються через компоненти вектора переміщень за формулами:

$$\sigma_{yy}(x, y) = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} + \lambda \frac{\partial u(x, y)}{\partial x},$$

$$\frac{1}{\mu} \tau_{xy}(x, y) = \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} + \frac{\partial v(x, y)}{\partial x},$$

де  $\lambda$  і  $\mu$  – пружні константи Ляме.

З останніх рівнянь і (8), (9) отримуємо

$$\frac{1}{2\mu} \tau_{xy}(x, y) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \left\{ \left[ -\alpha(A + By) - B \frac{\kappa - 1}{2} \right] e^{-\alpha y} + \left[ \alpha(C + Dy) - D \frac{\kappa - 1}{2} \right] e^{\alpha y} \right\} \sin(\alpha x) d\alpha. \quad (10)$$

$$\frac{1}{2\mu} \sigma_{yy}(x, y) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \left\{ \left[ -\alpha(A + By) - \frac{1 + \kappa}{2} B \right] e^{-\alpha y} + \left[ -\alpha(C + Dy) + \frac{1 + \kappa}{2} D \right] e^{\alpha y} \right\} \cos(\alpha x) d\alpha. \quad (11)$$

Введемо невідомі функції

$$f_1(x) = \frac{\partial u(x, 0)}{\partial x}, \quad f_2(x) = \frac{\partial v(x, 0)}{\partial x} \quad \text{на } 0 \leq x \leq b. \quad (12)$$

Тоді, задовольняючи граничним умовам (4)-(6) і знаходячи невідомі константи, з урахуванням (12) одержуємо

$$\tau_{xy}(x, 0) = \frac{4\mu}{\pi} \int_0^\infty \{g_{\sigma 1}(\alpha) \bar{f}_1(\alpha) + g_{\sigma 2}(\alpha) \bar{f}_2(\alpha)\} \sin(\alpha x) d\alpha + S_1(x) \quad (13)$$

$$\sigma_{yy}(x, 0) = -\frac{4\mu}{\pi} \int_0^\infty \{g_{\sigma 1}(\alpha) \bar{f}_1(\alpha) + g_{\sigma 2}(\alpha) \bar{f}_2(\alpha)\} \cos(\alpha x) d\alpha + S_2(x) \quad (14)$$

де

$$g_{\tau 1}(\alpha) = \frac{-(1 + \kappa)[2\alpha h + sh(2\alpha h)]}{D_1(\alpha)},$$

$$g_{\tau 2}(\alpha) = \frac{(1 - \kappa)[1 - ch(2\alpha h)] + 4\alpha^2 h^2}{D_1(\alpha)}$$

$$g_{\sigma 1}(\alpha) = \frac{(1 - \kappa)[1 - ch(2\alpha h)] + 4\alpha^2 h^2}{D_1(\alpha)},$$

$$g_{\sigma 2}(\alpha) = \frac{(1 + \kappa)[2\alpha h - sh(2\alpha h)]}{D_1(\alpha)}$$

$$S_1(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \left\{ \frac{(-1 + \kappa)sh(\alpha h) - 2\alpha h ch(\alpha h)}{D_1(\alpha)} (1 + \kappa) P \cos(\alpha a) \right\} \sin(\alpha x) d\alpha$$

$$S_2(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \left\{ \frac{(1 + \kappa)ch(\alpha h) + 2\alpha h sh(\alpha h)}{D_1(\alpha)} (1 + \kappa) P \cos(\alpha a) \right\} \cos(\alpha x) d\alpha$$

$$\bar{f}_1(\alpha) = \int_0^\infty f_1(t) \cos(\alpha t) dt, \quad \bar{f}_2(\alpha) = \int_0^\infty f_2(t) \sin(\alpha t) dt, \quad (15)$$

Враховуючи поведінку функцій  $g_{\tau 1}(\alpha)$ ,  $g_{\tau 2}(\alpha)$ ,  $g_{\sigma 1}(\alpha)$  і  $g_{\sigma 2}(\alpha)$  при  $\alpha \rightarrow \infty$ , представимо ці функції у наступному вигляді:

$$g_{\tau 1}(\alpha) = -\kappa_1 + \tilde{g}_{\tau 1}(\alpha), \quad g_{\tau 2}(\alpha) = \kappa_2 + \tilde{g}_{\tau 2}(\alpha),$$

$$g_{\sigma 1}(\alpha) = \kappa_2 + \tilde{g}_{\sigma 1}(\alpha), \quad g_{\sigma 2}(\alpha) = -\kappa_1 + \tilde{g}_{\sigma 2}(\alpha) \quad (16)$$

де  $\kappa_1 = \frac{\kappa + 1}{2\kappa}$ ,  $\kappa_2 = \frac{\kappa - 1}{2\kappa}$ , а функції  $\tilde{g}_{\tau 1}(\alpha)$ ,  $\tilde{g}_{\tau 2}(\alpha)$ ,  $\tilde{g}_{\sigma 1}(\alpha)$  і  $\tilde{g}_{\sigma 2}(\alpha)$  прямують до нуля при  $\alpha \rightarrow \infty$ .

Враховуючи представлення (17) і (18) а також наступні інтегральні формули

$$\int_0^\infty e^{-\eta \alpha} \sin \alpha (x \mp y) d\alpha = \frac{1}{x \mp y} \quad \text{при } \eta \rightarrow 0.$$

$$\int_0^\infty f_1(t) \int_0^\infty \sin(\alpha t) \sin(\alpha x) d\alpha dt = \frac{\pi}{2} f_1(x) \quad (i = 1, 2),$$

вирази для напружень (15), (16) після низки перетворень можна представити у вигляді:

$$\frac{\tau_{xy}(x, 0)}{2\mu} = \frac{\kappa_1}{\pi} \int_{-b}^b \frac{f_1(t)}{t - x} dt + \kappa_2 f_2(x) + \frac{1}{\pi} \int_{-b}^b [f_1(t) \hat{R}_{11}(x, t) + f_2(t) \hat{R}_{12}(x, t)] dt + \frac{S_1(x)}{2\mu} \quad (17)$$

$$\frac{\sigma_{yy}(x, 0)}{2\mu} = -\kappa_2 f_1(x) + \frac{\kappa_1}{\pi} \int_{-b}^b \frac{f_2(t)}{t - x} dt + \frac{1}{\pi} \int_{-b}^b [f_1(t) \hat{R}_{21}(x, t) + f_2(t) \hat{R}_{22}(x, t)] dt + \frac{S_2(x)}{2\mu}, \quad (18)$$

де  $\hat{R}_{11}(x, t) = \int_0^\infty [\tilde{g}_{\tau 1}(\alpha) \sin \alpha (x - t)] d\alpha$ ,  $\hat{R}_{12}(x, t) = \int_0^\infty \tilde{g}_{\tau 2}(\alpha) \cos \alpha (x - t) d\alpha$

$\hat{R}_{21}(x, t) = -\int_0^\infty \tilde{g}_{\sigma 1}(\alpha) \cos \alpha (x - t) d\alpha$ ,  $\hat{R}_{22}(x, t) = \int_0^\infty \tilde{g}_{\sigma 2}(\alpha) \sin \alpha (x - t) d\alpha$

Задовольняючи тепер граничним умовам (3) і (7), приходимо до наступної системи сингулярних інтегральних рівнянь:

$$\frac{1}{\pi} \int_{-b}^b \frac{f_1(t)}{t - x} dt + \mathcal{V}_2^+(x) + \int_{-b}^b [M_{11}(x, t) f_1(t) + M_{12}(x, t) f_2(t)] dt = -\frac{S_1(x)}{2\mu \kappa_1} \quad (19)$$



$$-\gamma f_1(x) + \frac{1}{\pi} \int_{-b}^b \frac{f_2(t)}{t-x} dt + \int_{-b}^b [M_{21}(x,t) f_1(t) + M_{22}(x,t) f_2(t)] dt = -\frac{S_2(x) + p}{2\mu k_1} \quad (20)$$

де  $\gamma = \frac{\kappa-1}{\kappa+1}$ ,  $M_{ij}(x,t) = \hat{R}_{ij}(x,t) / (\pi k_1)$ ,  $i, j = 1, 2$ .

Додаткові умови для цієї системи мають вигляд

$$\int_{-b}^b f_1(t) dt = 0, \quad \int_{-b}^b f_2(t) dt = 0 \quad (21)$$

### Чисельний аналіз.

Показано, що розв'язок системи (19), (20) має осцилюючу сингулярність біля вершин тріщини, але згідно [11] для знаходження глобальних параметрів руйнування і швидкості звільнення енергії (ШЗЕ) осциляцію можна не враховувати і розшуквати розв'язок цієї системи у формі:

$$f_i(t) = \frac{f_i^*(t)}{\sqrt{b^2 - t^2}} \quad (i=1,2) \quad (22)$$

Підставляючи (22) в (19)-(21) і переходячи за допомогою заміни  $x = br$ ,  $t = bs$  до проміжку  $[-1, 1]$ , одержуємо

$$\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{\psi_1^*(s) ds}{(s-r)\sqrt{1-s^2}} + \frac{\gamma \psi_2^*(r)}{\sqrt{1-r^2}} + b \int_{-1}^1 [M_{11}(x,t) \frac{\psi_1^*(s)}{\sqrt{1-s^2}} + M_{12}(x,t) \frac{\psi_2^*(s)}{\sqrt{1-s^2}}] dt = \tilde{S}_1(r) \quad (23)$$

$$-\frac{\gamma \psi_1^*(r)}{\sqrt{1-r^2}} + \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{\psi_2^*(s) ds}{(s-r)\sqrt{1-s^2}} + b \int_{-1}^1 [M_{21}(x,t) \frac{\psi_1^*(s)}{\sqrt{1-s^2}} + M_{22}(x,t) \frac{\psi_2^*(s)}{\sqrt{1-s^2}}] dt = \tilde{S}_2(r) \quad (24)$$

$$\int_{-1}^1 \frac{\psi_1^*(s)}{\sqrt{1-s^2}} dt = 0, \quad \int_{-1}^1 \frac{\psi_2^*(s)}{\sqrt{1-s^2}} dt = 0 \quad (25)$$

де  $\psi_1^*(s) = f_1^*(bs)$ ,  $\psi_2^*(s) = f_2^*(bs)$ ,  $\tilde{S}_1(r) = -\frac{S_1(br)}{2\mu k_1}$ ,

$$\tilde{S}_2(r) = -\frac{S_2(br) + p_0}{2\mu k_1}$$

Розглядаємо рівняння (23), (24) у вузлах

$$r_i = \cos\left(\frac{\pi i}{N}\right), \quad i = 1, \dots, N-1,$$

і застосовуємо для обчислення інтегралів квадратурну формулу Гауса-Чебишева:

$$\int_{-1}^1 \frac{\psi_m^*(s)}{\sqrt{1-s^2}} ds = \sum_{k=1}^N \frac{\pi}{N} \psi_m^*(s_k) \quad (26)$$

де  $s_k = \cos\left(\frac{2k-1}{2N} \pi\right)$ ,  $k = 1, \dots, N$ .

Приходимо до системи:

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\psi_1^*(s_k)}{s_k - r_i} + \gamma \frac{\psi_2^*(r_i)}{\sqrt{1-r_i^2}} + \frac{b\pi}{N} \sum_{k=1}^N [M_{11}(x_i, t_k) \psi_1^*(s_k) + M_{12}(x_i, t_k) \psi_2^*(s_k)] = \tilde{S}_1(r_i) - \gamma \frac{\psi_1^*(r_i)}{\sqrt{1-r_i^2}} + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\psi_2^*(s_k)}{s_k - r_i} + \frac{b\pi}{N} \sum_{k=1}^N [M_{21}(x_i, t_k) \psi_1^*(s_k) + M_{22}(x_i, t_k) \psi_2^*(s_k)] = \tilde{S}_2(r_i), \quad (27)$$

де  $x_i = br_i$ ,  $t_k = bs_k$ ,  $i = 1, \dots, N-1$ .

Оскільки вузли  $r_k$  знаходяться між вузлами  $s_k$  і  $s_{k+1}$ , то знаходимо  $\psi_m^*(r_k)$  через  $\psi_m^*(s_k)$  і  $\psi_m^*(s_{k+1})$  за допомогою лінійної інтерполяції:

$$\psi_m^*(r_k) = \frac{(r_k - s_{k+1})}{s_k - s_{k+1}} \psi_m^*(s_k) + \frac{(r_k - s_k)}{s_{k+1} - s_k} \psi_m^*(s_{k+1}) \quad m = 1, 2. \quad (28)$$

Підставляючи (28) в (27), одержуємо

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\psi_1^*(s_k)}{s_k - r_i} + \sum_{k=1}^N \frac{\gamma}{\sqrt{1-r_i^2}} \left[ \delta_{i,k} \frac{(r_k - s_{k+1})}{s_k - s_{k+1}} \psi_2^*(s_k) + \delta_{i,k+1} \frac{(r_k - s_k)}{s_{k+1} - s_k} \psi_2^*(s_{k+1}) \right] + \frac{b\pi}{N} \sum_{k=1}^N [M_{11}(x_i, t_k) \psi_1^*(s_k) + M_{12}(x_i, t_k) \psi_2^*(s_k)] = \tilde{S}_1(r_i) \quad (29)$$

$$-\sum_{k=1}^N \frac{\gamma}{\sqrt{1-r_i^2}} \left[ \delta_{i,k} \frac{(r_k - s_{k+1})}{s_k - s_{k+1}} \psi_1^*(s_k) + \delta_{i,k+1} \frac{(r_k - s_k)}{s_{k+1} - s_k} \psi_1^*(s_{k+1}) \right] + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{\psi_2^*(s_k)}{s_k - r_i} + \frac{b\pi}{N} \sum_{k=1}^N [M_{21}(x_i, t_k) \psi_1^*(s_k) + M_{22}(x_i, t_k) \psi_2^*(s_k)] = \tilde{S}_2(r_i) \quad (30)$$

де  $\delta_{i,k}$  – символи Кронекера,  $i = 1, \dots, N-1$ .

Застосовуючи квадратурну формулу (26) до рівнянь (25), одержуємо

$$\sum_{k=1}^N \psi_1^*(s_k) = 0, \quad \sum_{k=1}^N \psi_2^*(s_k) = 0. \quad (31)$$

Рівняння (29)-(31) являють собою систему  $2N$  лінійних алгебраїчних рівнянь із  $2N$  невідомими  $\psi_1^*(s_k)$  і  $\psi_2^*(s_k)$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ).

Після розв'язку системи отримуємо:

$$f_m(bs_k) = \frac{f_m^*(bs_k)}{b\sqrt{1-s_k^2}}, \quad m = 1, 2; \quad k = 1, \dots, N,$$

а далі на основі (12) знаходяться похідні від переміщень верхнього берега тріщини, а за формулами

$$u(x, 0) = \int_{-b}^x \frac{\partial u(x, 0)}{\partial x} dx, \quad v(x, 0) = \int_{-b}^x \frac{\partial v(x, 0)}{\partial x} dx$$

визначаються самі переміщення. Напруження ж на продовженнях тріщини знаходяться за формулами (17), (18).

Згідно з [10] швидкість звільнення енергії  $G$  при розвитку тріщини може бути обчислена за формулою:

$$G = \frac{\pi b \mu}{\kappa + 1} \hat{K}^2 \quad (32)$$

$$\text{де } \hat{K} = \sqrt{[f_1^*(b)]^2 + [f_2^*(b)]^2}.$$

Чисельна ілюстрація одержаного розв'язку проведена для мікротріщини довжиною 2 мкм при товщинах накладки в діапазоні 0,6 мкм до 10 мкм (рис. 2). Крім того вважалось, що  $\nu = 0,3$ ,  $E = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ H / мкм}^2$ ,  $p_0 = 10^{-10} \text{ H/мкм}^2$ . Зосередженна сила  $P$  вибиралась в діапазоні від 0 до  $10^{-10} \text{ H}$  при значеннях  $a$  від 0 до 1 мкм (рис. 1).

Зазначимо, що для товщини накладки більшої 5 мкм результати розкриття тріщини фактично не відрізняються від відповідних результатів для півплощини, а для товщини меншої 0,6 мкм розкриття тріщини стають близькими до можливої границі використання лінійної теорії пружності.

Як видно з рис. 3 збільшення значення зосередженої сили приводить до значного зменшення розкриття тріщини. Її подальше збільшення призводить до закриття тріщини. Зміна положення прикладання зосередженої сили від центру тріщини до її краю призводить до зміни значення розкриття. Максимальне зменшення розкриття тріщини спостерігається при прикладанні зосе-

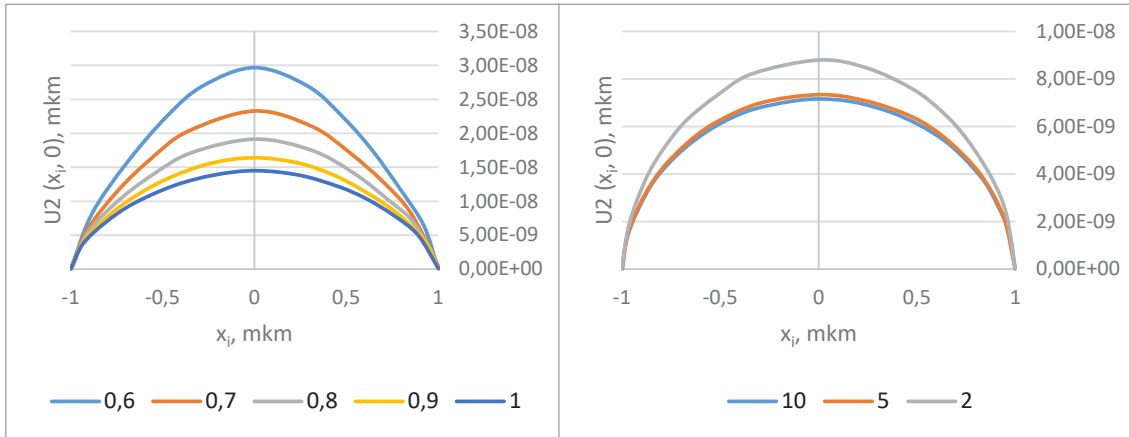


Рис. 2. Розкриття тріщини при  $h=0,6-10$  мкм ( $a=0,5$  мкм,  $P=0$ )

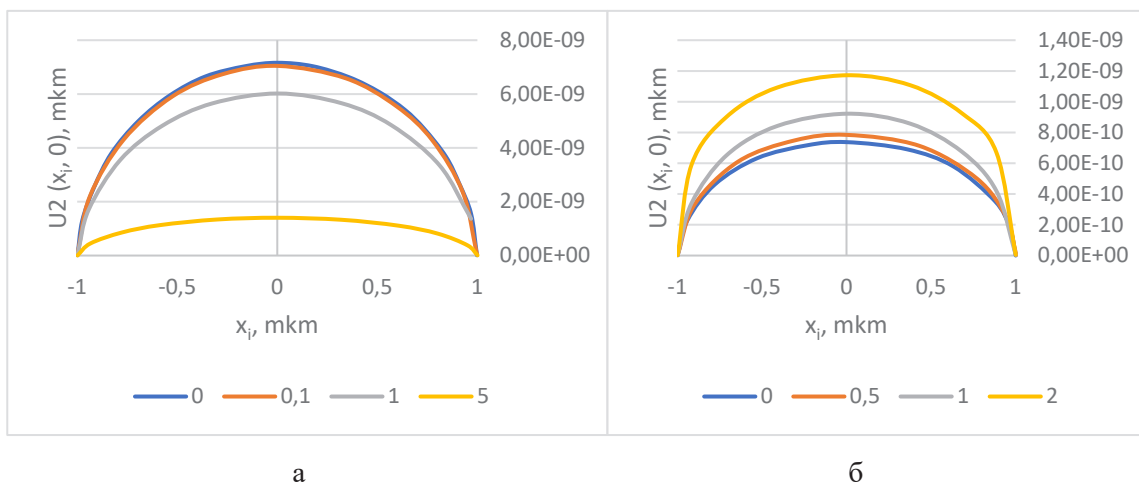


Рис. 3. Розкриття тріщини при:  
а –  $h=10$  мкм,  $a=0,5$  мкм,  $P=0-5 \cdot 10^{-10}$  Н; б –  $h=9$  мкм,  $a=0-2$  мкм,  $P=5 \cdot 10^{-10}$  Н

редженної сили по прямій, що проходить через центр тріщини, тоді як при віддалені точки прикладання за межі тріщини вплив зосередженої сили на розкриття тріщини стає незначним.

**Розрахунок за допомогою методу скінченних елементів**

Для випадку тонкої накладки скінченної довжини, що контактує з пружною основою скінченних розмірів (рис. 4) аналіз проведено за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ). Розглядалась мікротріщина довжиною  $a=2$  мкм при товщинах накладки в діапазоні  $l=0,6-10$  мкм. Крім того вибирались  $L=40$  мкм,  $H=60$  мкм,  $h=10$  мкм,  $\nu = 0,3$ ,  $E = 2,6 \cdot 10^{-2}$  н / мкм<sup>2</sup>,  $p_0 = 10^{-10}$  н/мкм<sup>2</sup>

При моделюванні методом скінченних елементів проводилось ущільнювання сітки скінченних елементів в деякому okolí тріщини (рис. 5). Ступінь ущільнення, а також розмір елементів варіювався в залежності від товщини накладки.

Отримані розподіли напружень, розкриття тріщини та швидкості звільнення енергії для різних механічних характеристик складових біматері-

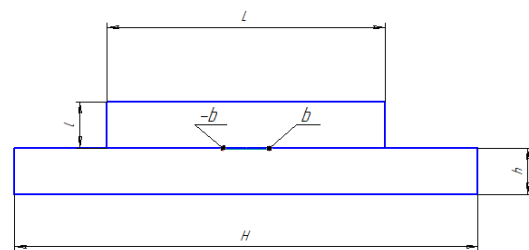


Рис. 4. Схема тонкої накладки для аналізу МСЕ

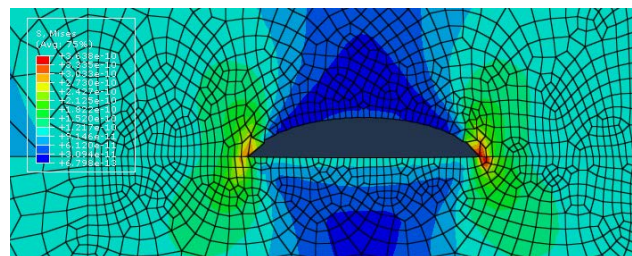
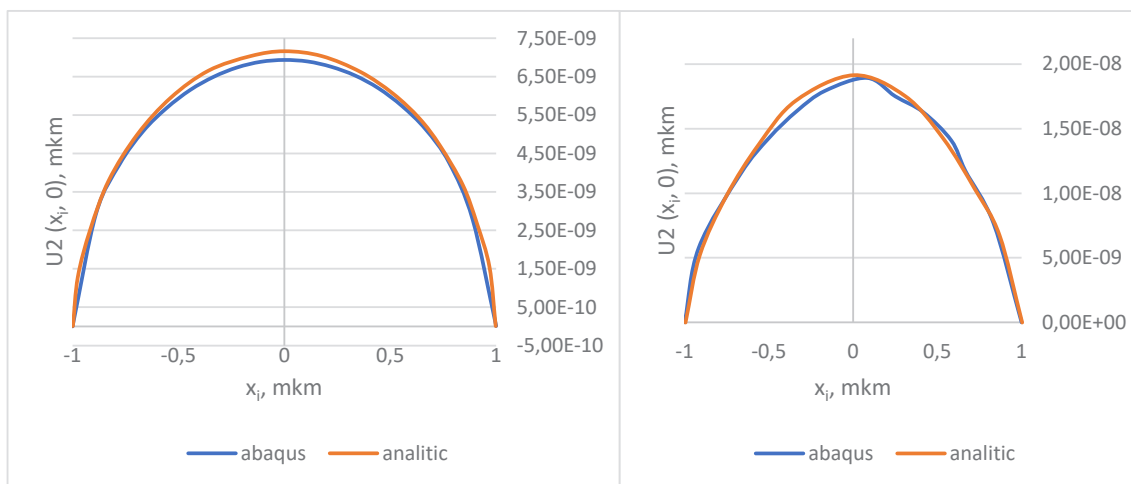


Рис. 5. Приклад сітки з розподілом напружень Мізеса при  $h=5$  мкм ( $a=0,5$  мкм,  $P=0$ )

Таблиця 1

Товщина накладки $h$ , мкм	ШЗЕ-10 <sup>-19</sup> [Н·м] (аналітичний розрахунок)	ШЗЕ-10 <sup>-19</sup> [Н·м] (розрахунок МСЕ)
10	5,385	5,346
5	5,675	5,725
2	7,775	7,747
1	15,917	15,995
0,9	18,663	18,576
0,8	22,663	22,588
0,7	28,831	28,781
0,6	39,099	39,044

Рис. 6. Порівняльний аналіз розкриття тріщини при:  $h=10$  мкм та  $h=0,8$  мкм

алу, їх різних геометричних характеристик і різних навантажень. Для випадку, коли жорсткість основи набагато більша жорсткості накладки, а її довжина набагато більша довжини тріщини, проведено порівняння аналітичних і чисельних результатів (табл. 1, рис. 6).

Наведені графіки та таблиці показують хороше узгодження результатів, отриманих аналітичним методом та МСЕ. Аналітичним та чисельним методами проаналізована також зміна форми розкриття тріщини зі зміною довжини накладки та її товщини, а також варіації швидкості звільнення енергії в залежності від зміни товщини накладки. Виявлено суттєвий ріст останнього фактору при зменшенні її товщини.

**Висновки.** Отримані результати дослідження свідчать про успішність застосування аналітичних методів для аналізу систем з мікротріщинами. Чисельна ілюстрація розв'язку, проведена для мікротріщини довжиною 2 мкм при різних

товщинах накладки, дозволила виявити важливі закономірності в розподілі напружень та розкритті тріщини. Зокрема, встановлено, що для товщини накладки більше 5 мкм результати практично не відрізняються від відповідних результатів для півплощини, а при товщині менше 0,6 мкм спостерігається наближення до можливої границі використання лінійної теорії пружності.

Отримані розподіли напружень, розкриття тріщини та швидкості звільнення енергії вказують на важливість врахування різних механічних та геометричних характеристик складових біматеріалу при аналізі його поведінки. Порівняння аналітичних і чисельних результатів показує їх високу узгодженість, що підтверджує надійність обраних методик.

Отримані висновки надають важливу інформацію для розробки нових моделей руйнування біматеріальних систем з мікротріщинами та підкреслюють необхідність подальших досліджень в цьому напрямку.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Hu K. Q.; Jin H.; Yang Z.; Chen X. Interface crack between dissimilar one-dimensional hexagonal quasicrystals with piezoelectric effect. *Acta Mechanica*. 2019. № 230. С. 2455–2474. DOI: 10.1007/s00707-019-02404-z.

2. Sheveleva A.; Loboda V.; Lapusta Y. A conductive crack and a remote electrode at the interface between two piezoelectric materials. *Applied Mathematical Modeling*. 2020. № 87. C. 287–299. DOI: 10.1016/j.apm.2020.06.003.
3. Verma, P. R. Magnetic-yielding zone model for assessment of two mode-III semi-permeable collinear cracks in piezo-electro-magnetic strip. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2022. № 29. C. 1529–1542.
4. Loboda, V., Sheveleva, A., Chapelle, F., Lapusta, Y. A set of electrically conducting collinear cracks between two dissimilar piezoelectric materials. *International Journal of Engineering Science*. 2022. № 178. C. 103725.
5. Онопрієнко О.Д., Говоруха В.Б., Кагадій Т.С., Шпорта А.Г. Аналіз тріщин та ефекти екранування в сучасних матеріалах. *Computer Science and Applied Mathematics*. 2023. № 2. C. 59–95.
6. Erdogan, F., Gupta, G.D. Layered composites with an interface flaw. *International Journal of Solids and Structures*. 1971. № 7. C. 1089–1107.
7. Delale, F., Erdogan, F. The crack problem for a nonhomogeneous plane. *Journal of Applied Mechanics*. 1983. № 50. C. 609–614.
8. Delale, F., Erdogan, F. Interface crack in a nonhomogeneous elastic medium. *International Journal of Engineering Science*. 1988. № 26(6). C. 559–568.
9. Ahmet Birinci, Fatma Birinci, Fevzi L. Cakiroglu, Ragip Erdol. An internal crack problem for an infinite elastic layer. *Archive of Applied Mechanics*. 2010. № 80. C. 997–1005.
10. Jianlin Liu, Runni Wu, and Re Xia. Surface effects at the nanoscale based on Gurtin's theory: a review. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2014. № 23(5-6). C. 141–151.
11. Zhang A.B., Wang B.L. An opportunistic analysis of the interface crack based on the modified interface dislocation method. *International Journal of Solids and Structures*. 2013. № 50. C. 15–20.

#### REFERENCES

1. Hu K. Q.; Jin H.; Yang Z.; Chen X. (2019) Interface crack between dissimilar one-dimensional hexagonal quasicrystals with piezoelectric effect. *Acta Mechanica*, № 230, pp. 2455–2474. DOI: 10.1007/s00707-019-02404-z.
2. Sheveleva A.; Loboda V.; Lapusta Y. (2020) A conductive crack and a remote electrode at the interface between two piezoelectric materials. *Applied Mathematical Modeling*, № 87, pp. 287–299. DOI: 10.1016/j.apm.2020.06.003.
3. Verma, P. R. (2022) Magnetic-yielding zone model for assessment of two mode-III semi-permeable collinear cracks in piezo-electro-magnetic strip. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, № 29, pp. 1529–1542.
4. Loboda, V., Sheveleva, A., Chapelle, F., Lapusta, Y. (2022) A set of electrically conducting collinear cracks between two dissimilar piezoelectric materials. *International Journal of Engineering Science*, № 178, p. 103725.
5. Onopriienko O. D., Govorukha V. B., Kagadii T. S., Shporta A. H. (2023) Analysis of cracks and shielding effects in modern materials. *Computer Science and Applied Mathematics*, № 2, pp. 59–95. (in Ukrainian)
6. Erdogan, F., Gupta, G.D. (1971) Layered composites with an interface flaw. *International Journal of Solids and Structures*, № 7, pp. 1089–1107.
7. Delale, F., Erdogan, F. (1983) The crack problem for a nonhomogeneous plane. *Journal of Applied Mechanics*, № 50, pp. 609–614.
8. Delale, F., Erdogan, F. (1988) Interface crack in a nonhomogeneous elastic medium. *International Journal of Engineering Science*, № 26(6), pp. 559–568.
9. Ahmet Birinci, Fatma Birinci, Fevzi L. Cakiroglu, Ragip Erdol. (2010) An internal crack problem for an infinite elastic layer. *Archive of Applied Mechanics*, № 80, pp. 997–1005.
10. Jianlin Liu, Runni Wu, and Re Xia. (2014) Surface effects at the nanoscale based on Gurtin's theory: a review. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, № 23(5-6), pp. 141–151.
11. Zhang A.B., Wang B.L. (2013) An opportunistic analysis of the interface crack based on the modified interface dislocation method. *International Journal of Solids and Structures*, № 50, pp. 15–20.

## РОЗДІЛ II. ІНЖЕНЕРІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

УДК 519.86

DOI <https://doi.org/10.26661/2786-6254-2024-2-02>

### НЕЙРО-НЕЧІТКА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ТА ВИБОРУ МІСЦЯ ПРИЗНАЧЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ЦІЛЮВИХ ПОТРЕБ ТУРИСТА

**Шафар А. А.**

*аспірант кафедри програмного забезпечення систем*

*ДВНЗ «Ужгородський національний університет»*

*вул. Заньковецької, 89А, Ужгород, Україна*

*[orcid.org/0009-0004-2445-8232](https://orcid.org/0009-0004-2445-8232)*

*[andrii.shafar@uzhnu.edu.ua](mailto:andrii.shafar@uzhnu.edu.ua)*

**Ключові слова:** *вибір місця призначення, нечітка математика, нейро-мережі, соціальний клас, багатокритеріальний вибір, цифрова трансформація.*

Запровадження нейро-нечітких моделей дозволяє інтегрувати кількісні та якісні аспекти оцінювання, зокрема суб'єктивні чинники, такі як емоції, переваги та цінності туристів. Це дає змогу створити більш персоналізовані та релевантні рекомендації щодо вибору місць відпочинку, підвищуючи задоволеність туристів та ефективність туристичних сервісів. Дослідження сприяє розвитку інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у сфері туризму, підвищенню конкурентоспроможності туристичних напрямків та задоволенню різноманітних потреб туристів. Основною метою проведеного дослідження є розроблення нейро-нечіткої моделі оцінювання та вибору місця призначення з урахуванням цільових потреб туриста, його соціального класу та сучасних туристичних тенденцій на прикладі Закарпатській, Львівській та Івано-Франківській областях. Для цього вперше розроблено: інформаційну модель оцінювання та вибору місця призначення, враховуючи соціальний клас туристів; нечіткий метод оцінювання рівня задоволеності туристом місця призначення (регіону); нейро-нечіткий метод виведення цільових потреб туристів відносно їх соціальних класів; нечіткий метод оцінювання та вибору місць призначення. Верифіковано розроблену модель на реальних даних та проілюстровано приклад побудови ранжувального ряду регіонів для вибору місця призначення в контексті сучасних туристичних тенденцій, враховуючи соціальний клас потенційного туриста. Для формалізації даних використовується математичний апарат експертного оцінювання, теорії нечітких множин, нечіткої логіки, інтелектуального аналізу знань, нейро-мереж та багатокритеріального оцінювання альтернатив. Цінність моделі полягає в тому, що: враховує враження від місць призначення (регіонів) окремих туристів, після цього здійснюється оцінювання та виводиться загальний рівень задоволеності туристами даного місця призначення, в розрізі по групах критеріїв, що задають тренди пріоритетності місць призначення у майбутньому; здійснюється обробка даних демографічних характеристик респондентів та прогноуються їх цільові потреби щодо місця призначення, на основі нейро-нечіткої мережі. На виході отримується ранжувальний ряд для вибору розумного напрямку місць призначення для потенційного туриста, враховуючи його цільові потреби або його соціальний клас.

## A NEURO-FUSSY MODEL FOR DESTINATION EVALUATION AND CHOICE TAKING INTO ACCOUNT THE TARGET NEEDS OF THE TOURIST

**Shafar A. A.**

*Postgraduate Student at the Department of Software Systems*

*Uzhhorod National University*

*Zankovetska str., 89A, Uzhhorod, Ukraine*

*orcid.org/0009-0004-2445-8232*

*andrii.shafar@uzhnu.edu.ua*

**Key words:** *choice of destination, fuzzy mathematics, neural networks, social class, multi-criteria choice, digital transformation.*

The introduction of neuro-fuzzy models allows the integration of quantitative and qualitative aspects of evaluation, in particular subjective factors such as emotions, preferences and values of tourists. This makes it possible to create more personalized and relevant recommendations for the choice of holiday destinations, increasing the satisfaction of tourists and the efficiency of tourist services. The research contributes to the development of intelligent decision support systems in the field of tourism, increasing the competitiveness of tourist destinations and meeting the various needs of tourists. The main goal of the research is to develop a neuro-fuzzy model for evaluating and choosing a destination, taking into account the target needs of the tourist, his social class and modern tourist trends, using the example of Zakarpattia, Lviv and Ivano-Frankivsk regions. For this purpose, the following was developed for the first time: an information model for evaluating and choosing a destination, taking into account the social class of tourists; a vague method of assessing the level of tourist satisfaction of the destination (region); a neuro-fuzzy method of deriving the target needs of tourists in relation to their social classes; a vague method of evaluating and selecting destinations. The developed model was verified on real data and an example of building a ranking series of regions for choosing a destination in the context of modern tourism trends, taking into account the social class of a potential tourist, was illustrated. The mathematical apparatus of expert evaluation, fuzzy set theory, fuzzy logic, intellectual analysis of knowledge, neural networks and multi-criteria evaluation of alternatives is used to formalize the data. The value of the model is that: it takes into account the impressions of the destinations (regions) of individual tourists, after that the evaluation is carried out and the general level of satisfaction of tourists of the given destination is derived, divided by groups of criteria that determine the priority trends of destinations in the future; data processing of respondents' demographic characteristics is carried out and their target needs regarding the destination are predicted, based on a neuro-fuzzy network. At the output, a ranking series is obtained for choosing a reasonable direction of destinations for a potential tourist, taking into account his target needs or his social class.

---

**Вступ.** Останні дослідження виявили кілька ключових тенденцій та факторів, що впливають на вибір місця призначення для подорожі. Одним з основних трендів є зростаюча увага до стійкого туризму. Інший важливий аспект стосується змін у поведінці туристів після пандемії. Мандрівники стали більше цінувати винятковий досвід, а також зросла увага до безпеки та якості послуг. Збільшилася частота подорожей, орієнтованих на здоров'я та відновлення, оскільки люди шукають способи розслабитися та відновити сили після стресів. Тому сьогодні постає задача удосконалення підходів до туристичного планування та обслуговування, що враховують індивідуальні переваги та потреби туристів. Сучасні туристи мають різноманітні очікування та вимоги до своїх подорожей, і традиційні методи оцінювання та вибору місць призначення можуть не враховувати ці складні і багатогранні фактори.

Запровадження нейро-нечітких моделей дозволяє інтегрувати кількісні та якісні аспекти оцінювання, зокрема суб'єктивні чинники, такі як емоції, переваги та цінності туристів. Це дає змогу створити більш персоналізовані та релевантні рекомендації щодо вибору місць відпочинку, підвищуючи задоволеність туристів та ефективність туристичних сервісів. Таким чином, дослідження сприяє розвитку інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у сфері туризму, підвищенню конкурентоспроможності туристичних напрямків та задоволенню різноманітних потреб туристів.

Основною метою проведеного дослідження є розроблення нейро-нечіткої моделі оцінювання та вибору місця призначення з урахуванням цільових потреб туриста, його соціальний клас та сучасні туристичні тенденції, наприкладі Закарпатській, Львівській та Івано-Франківській областях.

**Огляд літератури.** Впровадження інформаційно-комунікаційних технологій у процесах інтелектуального та електронного туризму забезпечує широкий потенціал даних і простір для створення багатовимірного аналізу та сценаріїв, а також алгоритмів прийняття рішень. Нові інструменти для розумного та електронного туризму постійно розробляються, але інформаційна невизначеність залишається. Багато досліджень підтверджують застосування нечітких підходів, як ефективного інструменту для вирішення багатокритеріальних проблем зі значними рівнями невизначеності у сфері інтелектуального туризму [1–3].

Мохаммед та ін. [4] пропонує рішення за допомогою застосування нечітких наборів і багатовимірного аналізу рішень. У дослідженнях [5; 6] застосували багатокритеріальне прийняття рішень для порівняльного аналізу додатків для управління даними інтелектуального електро-

ного туризму. Хем та ін. [7] за допомогою аналізу нечітких множин виявили, що готовність компаній до інформаційних технологій відіграє ключову роль у розвитку конкурентоспроможного інтелектуального туризму. У дослідженні [8] запропоновано новий підхід до систем рекомендацій у туристичній індустрії, тобто поєднання алгоритму ABC (Artificial Bee Colony) та Fuzzy TOPSIS. Розроблена система здійснює пошук між напрямками і, таким чином, рекомендує найкраще місце для туристів. Багато світових напрямків запровадили ініціативи розумного туризму з метою підвищення конкурентоспроможності та стійкості [9], тоді як для розумного туризму та розумних міст важливо забезпечити екологічну, економічну та соціальну стійкість.

Тим не менше, сьогодні не має комплексного підходу, що уможливорює рекомендувати місця призначення з урахуванням цільових потреб туриста та враховуючи його соціальний клас.

**Методи.** Нехай розглядається  $R = \{R_1; R_2; \dots; R_n\}$  – множина місць призначення (регіонів) щодо вибору їх для подорожі. Найважливіша множина туристів (респондентів)  $E = \{e_1; e_2; \dots; e_m\}$ , що вже відвідали місця призначення (регіонів) та оцінюють цього використовуючи критерії оцінювання, що задають тренди пріоритетності місць призначення у майбутньому. Множина критеріїв оцінювання  $K = \{K_{gh}; h = 1, m_g\}$ , які розбиті на групи  $G_1^g; G_2^g; \dots; G_l^g, g = 1, l$ . Критерії оцінювання, разом із системою оцінювання, представляють собою інформаційну модель ІМ оцінювання та вибору місця призначення, враховуючи соціальний клас  $S$  туристів.  $P$  – потенційний турист, для якого буде виведений ранжувальний ряд місць призначення (регіонів), з метою прийняття рішення щодо подорожі, враховуючи його цільові потреби.

Нехай нейро-нечітку модель оцінювання та вибору місця призначення враховуючи цільові потреби туриста задається у вигляді теоретико-множинної моделі наступним чином:

$$\{R, E, S, P, IM, M_1, M_2, M_3 | Y\}. \quad (1)$$

Тут маємо такі моделі керовані даними:  $M_1$  – нечіткий метод оцінювання рівня задоволеності туристом місця призначення (регіону);  $M_2$  – нейро-нечіткий метод виведення цільових потреб туристів відносно їх соціальних класів;  $M_3$  – нечіткий метод оцінювання та вибору місць призначення. В результаті отримується вихідна оцінка  $Y = \{A; R^*\}$ , де:  $A$  – ранжувальний ряд місць призначення (регіонів) відносно цільових потреб туристів, враховуючи їх соціальний клас;  $R^*$  – альтернативний варіант розумного напрямку для потенційного туриста при плануванні подорожі.

Нейро-нечітка модель представляється у розрізі чотирьох етапах.

На першому етапі здійснюється збір даних від респондентів за допомогою інформаційної моделі – *IM*.

Респонденти висловлюють своє враження від місця призначення щодо критеріїв, які представлені у вигляді питань. Причому, для формалізації такого ставлення пропонується множина лінгвістичних змінних  $L = \{l_1 - \text{“Зовсім не погоджуюсь”}; l_2 - \text{“Не погоджуюсь”}; l_3 - \text{“Ні погоджуюсь, ні не погоджуюсь”}; l_4 - \text{“Погоджуюсь”}; l_5 - \text{“Цілком погоджуюсь”}\}$ . Пропонуються наступні критерії оцінювання, які розбиті на 3 групи.

$G_1$  – безпека місця призначення:  $K_{11}$  – зрозумілі інформаційні таблиці щодо попередження про небезпеку;  $K_{12}$  – достатня кількість пристроїв, для контролю безпеки туристів;  $K_{13}$  – відсутність екологічного забруднення туристичного місця;  $K_{14}$  – належний рівень безпеки дорожнього руху;  $K_{15}$  – належний рівень безпеки якості місцевих продуктів та їжі;  $K_{16}$  – належний рівень безпеки помешкання;  $K_{17}$  – добре ставлення місцевих працівників до туристів;  $K_{18}$  – добре ставлення місцевих жителів до туристів;  $K_{19}$  – низька загроза здоров'ю в цілому;

$G_2$  – якість туристичної інфраструктури:  $K_{21}$  – якісна інфраструктура у місці призначення;  $K_{22}$  – добре розвинена мережа туристичної інформації;  $K_{23}$  – високий рівень гігієни та чистоти;  $K_{24}$  – у місці призначення добре розвинена торгівельна інфраструктура;  $K_{25}$  – у місці призначення добре розвинена зелена інфраструктура;  $K_{26}$  – у місці призначення сприятливий клімат;  $K_{27}$  – місце призначення щедра на культурні заходи;  $K_{28}$  – місце призначення щедра на історичні пам'ятки;  $K_{29}$  – місце призначення було не дорогим.

$G_3$  – загальні враження від місце призначення:  $K_{31}$  – місце призначення здавалося приємним місцем;  $K_{32}$  – місце призначення було веселим;  $K_{33}$  – місце призначення здавалося захоплюючим;  $K_{34}$  – високе бажання знову відвідати місце призначення у майбутньому;  $K_{35}$  – високе бажання рекомендувати місце призначення потенційним туристам.

Також від туристів збираються дані щодо їх демографічних характеристик. Комбінація значень демографічних характеристик представляє собою деякий соціальний клас – *S*. Наприклад, наводяться найпоширеніші демографічні характеристики, а також підходи їх формалізації:

$dh_1$  – кількість років учаснику туристичного руху.

Для формалізації пропонується використати трапецієподібну функцію належності, за наступною логікою: люди у віці від 21 до 37 років найбільше подорожують. Тоді функція належності буде мати вигляд:

$$\mu(dh_1) = \begin{cases} 0, & dh_1 \leq 18; \\ \frac{dh_1}{2} - 9, & 18 \leq dh_1 < 20; \\ 1, & 20 \leq dh_1 < 30; \\ \frac{75-dh_1}{45}, & 30 \leq dh_1 < 75; \\ 0, & dh_1 \geq 75. \end{cases} \quad (2)$$

$dh_2$  – соціально-економічний статус (студент; працевлаштований; безробітний; відпустка у зв'язку з вагітністю та пологами / опіка; пенсіонер). За допомогою характеристичної функції присвоюється деяка кількісна оцінка:

$$\mu(dh_2) = \begin{cases} 0,2 & \text{if } dh_2 = \text{“безробітний”}; \\ 0,4 & \text{if } dh_2 = \text{“декретна відпустка / опіка”}; \\ 0,6 & \text{if } dh_2 = \text{“студент”}; \\ 0,8 & \text{if } dh_2 = \text{“пенсіонер”}; \\ 1 & \text{if } dh_2 = \text{“працевлаштований”}. \end{cases} \quad (3)$$

$dh_3$  – рівень освіти (повна загальна середня освіта; професійно-технічна освіта; вища освіта ступінь бакалавр/вища освіта ступінь магістр). Аналогічно пропонується присвоїти кількісну оцінку за допомогою наступної характеристичної функції:

$$\mu(dh_3) = \begin{cases} 0,4 & \text{if } dh_3 = \text{“загальна середня”}; \\ 0,6 & \text{if } dh_3 = \text{“професійно – технічна”}; \\ 1 & \text{if } dh_3 = \text{“вища освіта”}. \end{cases} \quad (4)$$

$dh_4$  – середньомісячний дохід (до 6700 грн; 6700 – 10000 грн; 10000 – 14000 грн; 14000 – 18000 грн; 18000 – 22000 грн; 22000 – 26000 грн; 26000 – 30000 грн; 30000 – 34000 грн; більше 34000 грн). Використовується наступна характеристична функція для порівняння даних:

$$\mu(dh_4) = \begin{cases} 0,2 & \text{if } dh_4 = \text{“ до 6700 грн”}; \\ 0,3 & \text{if } dh_4 = \text{“6700 - 10000 грн”}; \\ 0,4 & \text{if } dh_4 = \text{“10000 - 14000 грн”}; \\ 0,5 & \text{if } dh_4 = \text{“14000 - 18000 грн”}; \\ 0,6 & \text{if } dh_4 = \text{“18000 - 22000 грн”}; \\ 0,7 & \text{if } dh_4 = \text{“22000 - 26000 грн”}; \\ 0,8 & \text{if } dh_4 = \text{“26000 - 30000 грн”}; \\ 0,9 & \text{if } dh_4 = \text{“30000 - 34000 грн”}; \\ 1 & \text{if } dh_4 = \text{“більше 34000 грн”}. \end{cases} \quad (5)$$

Далі наводяться математичні методи у загальному вигляді, що не залежать від кількості критеріїв чи демографічних характеристик.

На другому етапі здійснюється обробка даних від респондентів, за допомогою нечіткого методу оцінювання рівня задоволеності туристом місця призначення –  $M_1$ .

Туристи оцінюють регіон на основі своїх вражень та досвіду, використовуючи критерії оцінювання, які впливають на їх вподобання та задають пріоритетність місць призначення у майбутньому. В результаті отримується набір вхідних лінгвістичних змінних. Для порівняння даних здійснюється перехід від лінгвістичних міркувань туристів по кожному критерію, до однієї агрегованої



нормованої оцінки за групами критеріїв. Для цього присвоюється деяка кількісна оцінка  $\delta$  кожній лінгвістичній змінній за допомогою наступної характеристичної функції:

$$\delta = \begin{cases} \delta_1 = 1 & \text{якщо Зовсім не погоджуюсь,} \\ \delta_2 = 2 & \text{якщо Не погоджуюсь,} \\ \delta_3 = 3 & \text{якщо Ні погоджуюсь, ні не погоджуюсь,} \\ \delta_4 = 4 & \text{якщо Погоджуюсь,} \\ \delta_5 = 5 & \text{якщо Цілком погоджуюсь.} \end{cases} \quad (6)$$

Для порівняння даних, потрібно отримати нормовані оцінки окремо для груп критеріїв в розрізі туристів. Пропонується це здійснити на основі теорії нечітких множин та функцій належності. Наприклад, квадратичний S-сплайн буде задаватися наступною формулою:

$$\mu(e)_g = \begin{cases} 0, & \Delta_g \leq m_g; \\ \frac{1}{8} \left( \frac{\Delta_g}{m_g} - 1 \right)^2, & m_g < \Delta_g \leq 3m_g; \\ 1 - \frac{1}{8} \left( 5 - \frac{\Delta_g}{m_g} \right)^2, & 3m_g < \Delta_g < 5m_g; \\ 1, & \Delta_g \geq 5m_g. \end{cases} \quad g = \overline{1, l}. \quad (7)$$

Де  $\Delta_g$  – агрегована кількісна оцінка в розрізі туристах  $e$ :  $\Delta_g = \sum_{h=1}^{m_g} \delta_{gh}$ ,  $g = \overline{1, l}$ ,  $m_g$  – кількість критеріїв у  $g$  – вий групі критеріїв.

Таким чином, для кожної групи факторів  $g$ , у розрізі по туристах, у деякому місці призначення  $R_j$ , отримуються нормовані оцінки  $\mu(e_i)_{gj} \in [0; 1]$ ,  $i = 1, m; g = \overline{1, l}; j = \overline{1, n}$ , що уможливають розкривати суб'єктивізм експертних висновків.

Для виведення загального рівня задоволеності туристами місця призначення (регіону) щодо знаходиться зважена сума в розрізі по групах критеріїв:

$$\theta_{gj} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mu(e_i)_{gj}, \quad g = \overline{1, l}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Нормовані оцінки  $\theta_{gj} \in [0; 1]$  вказують на загальний рівень задоволеності туристами від відвідування місця призначення (регіону) відповідно по групах критеріїв оцінювання щодо сучасних туристичних тенденцій. Чим більший рівень, тим вища задоволеність туристів від подорожі.

На третьому етапі здійснюється обробка даних демографічних характеристик потенційних туристів та прогнозуються їх цільові потреби щодо місця призначення. Це здійснюється за допомогою нейро-нечіткого методу –  $M_2$ .

Нехай на вхід нейро-нечіткого методу подаються оцінки демографічних характеристик потенційного туриста, що в сукупності представляють собою деякий соціальний клас  $S = (dh_1, dh_2, \dots, dh_{st})$ . Розглядається об'єкт виду  $\gamma = f(dh_1, dh_2, \dots, dh_{st})$  для якого зв'язок “входи  $dh_q$  – вихід  $\gamma$ ” подаються у вигляді продукційних правил нечіткої бази знань:

ЯКЩО ( $dh_1$  з вагою  $\alpha_1$ ) ТА ( $dh_2$  з вагою  $\alpha_2$ ) ТА ... ТА ( $dh_{st}$  з вагою  $\alpha_{st}$ ) ТОДІ  $\gamma$

Де  $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_l)$  – це цільові потреби сучасних туристичних тенденцій, що співвідносяться із групами критеріїв оцінювання  $G_1, G_2, \dots, G_l$ .

Згідно представленої інформаційної моделі  $IM$  потрібно побудувати базу нечітких знань цільових потреб туристів, що складається з систем логічних висловлювань – “Якщо – Тоді, Інакше”, які пов'язують значення вхідних лінгвістичних цільових потреб ( $Z_1, Z_2, \dots, Z_l$ ) з одним із можливих кількісних значень  $U$ :

ЯКЩО  $Z_1 = \gamma_{1l}$  та  $Z_2 = \gamma_{2l}$  та ... та  $Z_l = \gamma_{ll}$  ТОДІ  $U = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_l)$  ІНАКШЕ... Пропонується нечітка база знань цільових потреб наступним чином.

$G_1$  – безпека місця призначення: якщо  $\gamma_1 = [0; 0, 25]$  тоді мінімальна потреба у безпеці ( $\gamma_{11}$ ); якщо  $\gamma_1 = (0, 25; 0, 5]$  тоді незначна потреба у безпеці ( $\gamma_{12}$ ); якщо  $\gamma_1 = (0, 5; 0, 65]$  тоді значна потреба у безпеці ( $\gamma_{13}$ ); якщо  $\gamma_1 = (0, 65; 0, 85]$  тоді пріоритетна потреба у безпеці ( $\gamma_{14}$ ); якщо  $\gamma_1 = (0, 85; 1]$  тоді найвища пріоритетна потреба у безпеці ( $\gamma_{15}$ ).

$G_2$  – якість туристичної інфраструктури: якщо  $\gamma_2 = [0; 0, 25]$  тоді мінімальна потреба у якісній туристичній інфраструктурі ( $\gamma_{21}$ ); якщо  $\gamma_2 = (0, 25; 0, 45]$  тоді незначна потреба у якісній туристичній інфраструктурі ( $\gamma_{22}$ ); якщо  $\gamma_2 = (0, 45; 0, 55]$  тоді значна потреба у якісній туристичній інфраструктурі ( $\gamma_{23}$ ); якщо  $\gamma_2 = (0, 55; 0, 85]$  тоді пріоритетна потреба у якісній туристичній інфраструктурі ( $\gamma_{24}$ ); якщо  $\gamma_2 = (0, 85; 1]$  тоді найвища пріоритетна потреба у якісній туристичній інфраструктурі ( $\gamma_{25}$ ).

$G_3$  – загальні враження від місця призначення: якщо  $\gamma_3 = [0; 0, 35]$  ,тоді мінімальна потреба щодо вражень від місця призначення ( $\gamma_{31}$ ); якщо  $\gamma_3 = (0, 35; 0, 55]$  ,тоді незначна потреба щодо вражень від місця призначення ( $\gamma_{32}$ ); якщо  $\gamma_3 = (0, 55; 0, 65]$  ,тоді значна потреба щодо вражень від місця призначення ( $\gamma_{33}$ ); якщо  $\gamma_3 = (0, 65; 0, 85]$  тоді пріоритетна потреба щодо вражень від місця призначення ( $\gamma_{34}$ ); якщо  $\gamma_3 = (0, 85; 1]$  , тоді найвища пріоритетна потреба щодо вражень від місця призначення ( $\gamma_{35}$ ).

База знань є відкрита, не залежить від кількості правил у цільових потребах. Особа, яка налаштує всі процеси оцінювання, завжди може її корегувати шляхом зміни кількісних рівнів або правил у цільових потребах.

Для виведення прогнозованого рівня цільових потреб  $\gamma$  сучасних туристичних тенденцій для потенційного туриста, який має свій набір демографічних характеристик, представляється чотири шаровий нейро-нечіткий метод. Причому кількість нейро-мереж буде відповідати кількості цільових потреб  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_l$ , а відрізняться вони





Таблиця 2  
Загальний рівень задоволеності туристами  
в регіонах

	Область	Назва району	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
$R_1$	Закарпатська	Тячівський	0,268	0,65	0,709
$R_2$	Львівська	Львівський	0,373	0,754	0,8
$R_3$	Закарпатська	Ужгородський	0,31	0,69	0,773
$R_4$	Закарпатська	Мукачівський	0,262	0,71	0,765
$R_5$	Івано-Франківська	Івано-Франківський	0,29	0,777	0,816
$R_6$	Закарпатська	Рахівський	0,366	0,712	0,77

На третьому етапі моделі здійснюється обробка даних демографічних характеристик потенційних туристів та прогноуються їхні цільові потреби щодо місця призначення на основі сучасних туристичних тенденцій за допомогою нейро-нечіткого методу –  $M_2$ .

Нехай існує деякий потенційний турист,  $P$  для якого буде виведений ранжувальний ряд регіонів  $R_1 - R_6$ . Потенційний турист має наступні оцінки демографічних характеристик: {36 років; працевлаштований; вища освіта; 22000 – 26000 грн}.

Далі для виведення прогнозованого рівня цільових потреб  $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ . здійснюється операція фазифікації для кожної демографічної характеристики за формулами (2)-(5) відповідно:  $\mu(dh_1) = 0,87$ ;  $\mu(dh_2) = 1$ ;  $\mu(dh_3) = 1$ ;  $\mu(dh_4) = 0,7$ .

327 респондентів висловилися щодо лінгвістичних цільових потреб, а саме:  $\gamma_1$  – безпека місця призначення;  $\gamma_2$  – якість туристичної інфраструктури;  $\gamma_3$  – загальні враження від місця призначення. На основі отриманого реального набору даних було проведено навчання нейро-нечіткої мережі за допомогою методу зворотного поширення похибки. В результаті отримуються синаптичні ваги для кожної окремої цільової потреби:

$$\gamma_1 : \alpha_1 = 0,839 ; \alpha_2 = 0,911 ; \alpha_3 = 0,824 ; \alpha_4 = 0,953.$$

$$\gamma_2 : \alpha_1 = 0,692 ; \alpha_2 = 0,831 ; \alpha_3 = 0,7 ; \alpha_4 = 0,882.$$

$$\gamma_3 : \alpha_1 = 0,882 ; \alpha_2 = 0,851 ; \alpha_3 = 0,721 ; \alpha_4 = 0,89.$$

Далі обчислюються функції постсинаптичного потенціалу нейронів другого шару, за формулою (9), у розрізі по цільовим потребам:

$$\omega_1(\gamma_1) \approx 0,7488 ; \omega_2(\gamma_1) \approx 0,8131 ; \omega_3(\gamma_1) \approx 0,7354 ; \omega_4(\gamma_1) \approx 0,8506.$$

$$\omega_1(\gamma_2) \approx 0,6176 ; \omega_2(\gamma_2) \approx 0,7417 ; \omega_3(\gamma_2) \approx 0,6248 ; \omega_4(\gamma_2) \approx 0,7872.$$

$$\omega_1(\gamma_3) \approx 0,7872 ; \omega_2(\gamma_3) \approx 0,7595 ; \omega_3(\gamma_3) \approx 0,6435 ; \omega_4(\gamma_3) \approx 0,7943.$$

Далі для кожної демографічної характеристики системний аналітик визначає синаптичні ваги відповідно з деякого інтервалу  $[1;10]$ , наприклад:  $\beta_1 = 6; \beta_2 = 8; \beta_3 = 6; \beta_4 = 10$ . Потім за формулою (10) відбувається обчислення функції постсинаптичного потенціалу нейронів третього шару, відповідно у розрізі цільових потреб:

$$\eta_1(\gamma_1) \approx 0,1498 ; \eta_2(\gamma_1) \approx 0,2168 ; \eta_3(\gamma_1) \approx 0,1471 ; \eta_4(\gamma_1) \approx 0,2835.$$

$$\eta_1(\gamma_2) \approx 0,1235 ; \eta_2(\gamma_2) \approx 0,1978 ; \eta_3(\gamma_2) \approx 0,125 ; \eta_4(\gamma_2) \approx 0,2624.$$

$$\eta_1(\gamma_3) \approx 0,1574 ; \eta_2(\gamma_3) \approx 0,2025 ; \eta_3(\gamma_3) \approx 0,1287 ; \eta_4(\gamma_3) \approx 0,2648.$$

На четвертому шарі здійснюється дефазифікація даних за формулою (11) окремо по цільовим потребам:  $\gamma_1 = 0,7972$ ;  $\gamma_2 = 0,7086$ ;  $\gamma_3 = 0,7534$ .

Отриману оцінку можна співставити до лінгвістичного трактування цільових потреб. Тоді отримується, що потенційний турист, як представник соціального класу, має наступні пріоритети: для  $G_1$  (безпека місця призначення) має пріоритетну потребу у безпеці –  $Z_1$ ; для  $G_2$  (якість туристичної інфраструктури) має пріоритетну потребу у якійшій туристичній інфраструктурі –  $Z_2$ ; для  $G_3$  (загальні враження від місця призначення) має пріоритетну потребу щодо вражень від місця призначення –  $Z_3$ .

На четвертому етапі моделі здійснюється побудова ранжувального ряду регіонів  $R_1 - R_6$  для вибору потенційним туристом відносно соціального класу, на основі нечіткого методу оцінювання та вибору місць призначення –  $M_3$ .

Нехай «вектор задоволення»  $T^* = (Z_1, Z_2, Z_3)$  був отриманий на основі нейро-нечіткого методу  $M_2$ . Тоді  $(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) = (t_1, t_2, t_3) = (0,7972 ; 0,7086 ; 0,7534)$ . Далі знаходяться відносні оцінки близькості регіонів до «вектору задоволення». Для цього обчислюються функції належності близькості регіонів до «вектору задоволення» за формулою (14). Далі отриманий результат підставляється у формулу (13). Результати обчислення наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

## Оцінки близькості до «вектору задоволення»

	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$
$\varphi_1$	0,989	0,793	0,91	0,948	0,948	0,806
$\varphi_2$	0,857	0,664	0,272	0,02	1	0,05
$\varphi_3$	0,709	0,744	0,313	0,185	1	0,265
$q_1$	0,011	0,207	0,09	0,052	0,052	0,194
$q_2$	0,143	0,336	0,728	0,98	0	0,95
$q_3$	0,291	0,256	0,687	0,815	0	0,735

Нехай ОПР задає вагові коефіцієнти за кожною групою критеріїв оцінювання  $\{10;7;9\}$ . За формулою (15) проводиться їх нормування:  $\bar{u}_1 = 0,39$ ;  $\bar{u}_2 = 0,27$ ;  $\bar{u}_3 = 0,34$ . Для побудови ранжувального ряду районів, використовується формула (16):  $Y(f_1) = 0,144$ ;  $Y(f_2) = 0,259$ ;  $Y(f_3) = 0,468$ ;  $Y(f_4) = 0,566$ ;  $Y(f_5) = 0,02$ ;  $Y(f_6) = 0,585$ .

На основі отриманих агрегованих оцінок будується ранжувальний ряд регіонів:  $R_6, R_4, R_3, R_2, R_1, R_5$ . В якості альтернативного варіанту для потенційного туриста, враховуючи його соціальний клас та сучасні туристичні тенденції, отримується  $R^* = R_6$  – Рахівський район Закарпатської області.

**Висновки.** У роботі розроблена нейро-нечітка модель оцінювання та вибору місця призначення з урахуванням цільових потреб туриста, його соціальний клас та сучасні туристичні тенденції на прикладі Закарпатської, Львівської та Івано-Франківської областей. Для цього вперше розроблено: інформаційну модель оцінювання та вибору місця призначення, враховуючи соціальний клас туристів; нечіткий метод оцінювання рівня задоволеності туристом місця призначення (регіону); нейро-нечіткий метод виведення цільових потреб туристів відносно їх соціальних класів; нечіткий метод оцінювання та вибору місць призначення. Верифіковано розроблену модель на реальних даних та проілюстровано приклад побудови ранжувального ряду регіонів для вибору місця призначення в контексті сучасних туристичних тенденцій, враховуючи соціальний клас потенційного туриста.

тичних тенденцій, враховуючи соціальний клас потенційного туриста.

Цінність моделі в тому, що: враховує враження від місць призначення (регіонів) окремих туристів, після цього здійснюється оцінювання та виводиться загальний рівень задоволеності туристами даного місця призначення, в розрізі по групах критеріїв, що задають тренди пріоритетності місць призначення у майбутньому; здійснюється обробка даних демографічних характеристик респондентів та прогноуються їх цільові потреби щодо місця призначення на основі нейро-нечіткої мережі. На виході отримується ранжувальний ряд для вибору розумного напрямку місць призначення (регіонів) для потенційного туриста, враховуючи його цільові потреби або його соціальний клас.

Поставлена задача представляє собою складну систему оцінювання, тому вона не може бути розв'язана відомими формальними підходами, що використовуються для розв'язування задач одного класу. У зв'язку з цим нейро-нечітка модель поєднує у собі ряд нечітких методів та підходів. Для формалізації даних використовується математичний апарат експертного оцінювання, теорії нечітких множин, нечіткої логіки, інтелектуального аналізу знань, нейро-мереж та багатокритеріального оцінювання альтернатив.

Подальше дослідження даної проблематики вбачаємо в конструюванні програмного забезпечення для можливості практичного застосування нейро-нечіткої моделі оцінювання та вибору місця призначення.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Badu-Baiden F., Correia A., Kim S. How do tourists' memorable local gastronomy experiences and their personal gastronomic traits influence destination loyalty? A fuzzy set approach. *Journal of Travel & Tourism Marketing*. 2022. 39(5). 501-515. DOI: 10.1080/10548408.2022.2148041.
2. Firmansyah H. S., Supangkat S. H., Arman A. A., Giabbanelli P. J. Identifying the components and interrelationships of smart cities in Indonesia: Supporting policymaking via fuzzy cognitive systems. *IEEE Access*. 2019. 7. 46136-46151. DOI: 10.1109/access.2019.2908622.
3. Ладик С., Базилюк К. Використання апарату теорії нечітких множин для оцінювання якості турпродукту. *Інновації та технології в сфері послуг і харчування*. 2022. 1(5). 47–51.
4. Mohammed R. T., Alamoodi A. H., Albahri O. S., Zaidan A. A., AlSattar H. A., Aickelin U., Albahri A. S., Zaidan B. B., Ismail A. R., Malik R. Q. A decision modeling approach for smart e-tourism data management applications based on spherical fuzzy rough environment. *Applied Soft Computing*. 2023. 143. 110297. DOI: 10.1016/j.asoc.2023.110297.
5. Alamoodi A.H., Mohammed R.T., Albahri O.S., Qahtan S., Zaidan A.A., Alsattar H.A., Albahri A.S., Aickelin U., Zaidan B.B., Baqer M.J., Najm Jasim A. Based on neutrosophic fuzzy environment: a new development of FWZIC and FDOSM for benchmarking smart e-tourism applications. *Complex Intell. Syst.* 2022. 8. 3479–3503. DOI: 10.1007/s40747-022-00689-7.
6. Milošević M. R., Milošević D. M., Stanojević A. D., Stević D. M., Simjanović D. J. Fuzzy and Interval AHP Approaches in Sustainable Management for the Architectural Heritage in Smart Cities. *Mathematics*. 2021. 9(4). 304. DOI: 10.3390/math9040304.
7. Ham J., Koo C., Chung N. Configurational patterns of competitive advantage factors for smart tourism: An equifinality perspective. *Current Issues in Tourism*. 2020. 23(9). 1066-1072. DOI: 10.1080/13683500.2019.1566303.
8. Forouzandeh S., Rostami M., Berahmand K. A hybrid method for recommendation systems based on tourism with an evolutionary algorithm and topsis model. *Fuzzy Information and Engineering*. 2022. 14(1). 26-50. DOI: 10.1080/16168658.2021.2019430.

9. Bastidas-Manzano A-B., Sánchez-Fernández J., Casado-Aranda L-a. The Past, Present, and Future of Smart Tourism Destinations: A Bibliometric Analysis. *Journal of Hospitality & Tourism Research*. 2020. 45(3). 529-552. DOI: 10.1177/1096348020967062.
10. Дані 327 респондентів для оцінювання та вибору місця призначення враховуючи цільові потреби туриста. URL: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1LlgRiHG1zP43xiIp7lyT7ydiqDXYX0fg/edit?usp=sharing&ouid=110688046638619396256&rtpof=true&sd=true> (дата звернення: 01.08.2024).

#### REFERENCES

1. Badu-Baiden F., Correia A., Kim S. (2022). How do tourists' memorable local gastronomy experiences and their personal gastronomic traits influence destination loyalty? A fuzzy set approach. *Journal of Travel & Tourism Marketing*. 39(5). 501-515. DOI: 10.1080/10548408.2022.2148041
2. Firmansyah H. S., Supangkat S. H., Arman A. A., Giabbanelli P. J. (2019). Identifying the components and interrelationships of smart cities in Indonesia: Supporting policymaking via fuzzy cognitive systems. *IEEE Access*. 7. 46136-46151. DOI: 10.1109/access.2019.2908622
3. Ladyk S., Bazylyuk K. (2022). Vykorystannya aparatu teoriiy nechitkykh mnozhyn dlya otsinyuvannya yakosti turproduktu. *Innovatsiyi ta tekhnolohiyi v sferi posluh i kharchuvannya*. 1(5). 47-51. (in Ukrainian).
4. Mohammed R. T., Alamoodi A. H., Albahri O. S., Zaidan A. A., AlSattar H. A., Aickelin U., Albahri A. S., Zaidan B. B., Ismail A. R., Malik R. Q. (2023). A decision modeling approach for smart e-tourism data management applications based on spherical fuzzy rough environment. *Applied Soft Computing*. 143. 110297. DOI: 10.1016/j.asoc.2023.110297
5. Alamoodi A.H., Mohammed R.T., Albahri O.S., Qahtan S., Zaidan A.A., Alsattar H.A., Albahri A.S., Aickelin U., Zaidan B.B., Baqer M.J., Najm Jasim A. (2022). Based on neutrosophic fuzzy environment: a new development of FWZIC and FDOSM for benchmarking smart e-tourism applications. *Complex Intell. Syst.* 8. 3479–3503. DOI: 10.1007/s40747-022-00689-7
6. Milošević M. R., Milošević D. M., Stanojević A. D., Stević D. M., Simjanović D. J. (2021). Fuzzy and Interval AHP Approaches in Sustainable Management for the Architectural Heritage in Smart Cities. *Mathematics*. 9(4). 304. DOI: 10.3390/math9040304
7. Ham J., Koo C., Chung N. (2020). Configurational patterns of competitive advantage factors for smart tourism: An equifinality perspective. *Current Issues in Tourism*. 23(9). 1066-1072. DOI: 10.1080/13683500.2019.1566303
8. Forouzandeh S., Rostami M., Berahmand K. (2022). A hybrid method for recommendation systems based on tourism with an evolutionary algorithm and topsis model. *Fuzzy Information and Engineering*. 14(1). 26-50. DOI: 10.1080/16168658.2021.2019430
9. Bastidas-Manzano A-B., Sánchez-Fernández J., Casado-Aranda L-a. (2020). The Past, Present, and Future of Smart Tourism Destinations: A Bibliometric Analysis. *Journal of Hospitality & Tourism Research*. 45(3). 529-552. DOI: 10.1177/1096348020967062
10. Data of 327 respondents for evaluation and selection of the destination taking into account the target needs of the tourist. URL: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1LlgRiHG1zP43xiIp7lyT7ydiqDXYX0fg/edit?usp=sharing&ouid=110688046638619396256&rtpof=true&sd=true> (date of access: 01.08.2024).

## РОЗДІЛ III. КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

УДК 004.67:629.7

DOI <https://doi.org/10.26661/2786-6254-2024-2-03>

### ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО КЕРУВАННЯ У СИСТЕМАХ ЗАПАЛЮВАННЯ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

**Бабич Г. О.**

*аспірант*

*Запорізький національний університет*

*вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна*

*orcid.org/0009-0007-9062-611C*

*annababich333@gmail.com*

**Шило Г. М.**

*доктор технічних наук,*

*завідувач кафедри комп'ютерних наук*

*Запорізький національний університет*

*вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна*

*orcid.org/0000-0002-5020-6707*

*shilo.gn@gmail.com*

**Ключові слова:**

*автоматизація систем  
запалювання, свічки  
напівпровідникові,  
частота іскроутворення,  
мікропроцесорне адаптивне  
керування, газотурбінний  
двигун.*

У статті наведено огляд існуючих систем запалювання газотурбінних двигунів. Визначена класифікація систем запалювання за принципом дії. Надано розгорнутий опис основних властивостей та аналіз особливостей кожної системи. З усіх розглянутих систем запалювання в даний час у авіаційній галузі найбільш широкое розповсюдження отримали ємнісні системи запалювання з напівпровідниковими свічками, які мають значні переваги над іншими системами, а саме можливість створення розрядних імпульсів великої енергії на свічках. Проаналізовано перспективні напрямки розвитку ємнісних систем запалювання та визначений найбільш сучасний напрямок розвитку – розробка систем запалювання з мікропроцесорним адаптивним керуванням частотою іскроутворення для стабілізації вихідної потужності. Докладно зазначені головні вимоги та особливості роботи мікропроцесорних елементів у складі систем запалювання авіаційних газотурбінних двигунів: висока зовнішня температура, вібрація, механічні удари, вимоги до електромагнітної сумісності, а саме, стійкої роботи в умовах впливу електромагнітних полів високої інтенсивності – HIRF (high-intensity radiated fields). Основним підходом до автоматизації системи запалювання має стати розробка ємнісних систем запалювання, параметрами роботи яких можна автоматично керувати у залежності від режимів та умов кожного конкретного запуску газотурбінного двигуна. У цьому випадку необхідні параметри іскрових розрядів для надійного займання суміші, наприклад в умовах висотного запуску, задаються вбудованою мікропроцесорною адаптивною системою керування, яка аналізує та вибирає режими з оптимальними параметрами іскрових розрядів, що мають різні енергії, частоту слідування та тривалість. Наведена базова структурна схема системи запалювання з вбудованою мікропроцесорною адаптивною системою керування. Описані задачі алгоритму адаптивного керування параметрами іскрових розрядів у системі запалювання газотурбінних двигунів.

## PERSPECTIVES FOR THE APPLICATION OF MICROPROCESSOR CONTROL IN IGNITION SYSTEMS OF GAS TURBINE ENGINE

**Babich G. O.**

*Postgraduate Student  
Zaporizhzhia National University  
Universytetska str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine  
orcid.org/0009-0007-9062-611C  
annababich333@gmail.com*

**Shilo G. M.**

*Doctor of Technical Sciences,  
Head of the Department of Computer Science  
Zaporizhzhia National University  
Universytetska str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine  
orcid.org/0000-0002-5020-6707  
shilo.gn@gmail.com*

**Key words:** *automated ignition system, semiconductor spark plugs, spark frequency, microprocessor adaptive control, gas turbine engine.*

The article provides an overview of existing ignition systems for gas turbine engines. The classification of ignition systems by the operating principle is determined. A detailed description of the main properties and an analysis of the features of each system are presented. Of all the ignition systems considered, capacitive ignition systems with semiconductor spark plugs are currently the most widely used in the aviation industry. They have significant advantages over other systems, namely, the ability to create high-energy discharge pulses on the spark plugs. Promising areas of development of capacitive ignition systems are analyzed and the most modern direction of development is determined – the development of ignition systems with microprocessor adaptive control of the spark frequency to stabilize the output power. The main requirements and features of the operation of microprocessor elements in the ignition systems of aircraft gas turbine engines are noted in detail: high ambient temperature, vibration, mechanical shocks, requirements for electromagnetic compatibility, namely, stable operation under the influence of high-intensity radiated fields – HIRF. The main approach to the automation of ignition systems should be the development of capacitive ignition systems, the operating parameters of which can be automatically controlled depending on the modes and conditions of each specific start of a gas turbine engine. In this case, the necessary parameters of spark discharges for reliable ignition of the mixture, for example, under high-altitude start conditions, are set by a built-in microprocessor adaptive control system, which analyzes and selects modes with optimal parameters of spark discharges that have different energy, repetition frequency and duration. The article presents a basic structural diagram of an ignition system with a built-in microprocessor control system. The tasks of the algorithm for adaptive control of spark discharge parameters in the ignition system of gas turbine engines are described.

**Вступ.** Предметом дослідження є електричні системи запалювання, що становлять одну з найбільш відповідальних частин комплексу електрообладнання двигунів літальних апаратів. Вони використовуються для займання паливо-повітряної суміші в камері згоряння при запуску газотурбінних двигунів як на землі, так і в польоті. Від частоти іскроутворення на свічці, яка характеризує вихідну потужність системи запалювання,

залежить надійність запуску та експлуатації газотурбінних двигунів [1].

Значний зріст швидкостей та висот польоту, збільшення потужності двигунів приводять до ускладнення функцій, які виконують літальні апарати, та посилення вимог, пред'явлених до силових установок. Тому існує необхідність удосконалення електричних систем запалювання та пошуку нових рішень, що направлені на підви-



щення їх енергетичної ефективності, надійності у роботі та збільшення ресурсних показників, що і становить **мету** дослідження.

Існуючі традиційні методи підвищення ефективності систем запалювання практично вичерпані. Тож особливо актуальним є пошук нових можливостей удосконалення систем запалювання.

Отже, **завданням** роботи є проведення досліджень, спрямованих на розробку нових систем запалювання з мікропроцесорним адаптивним керуванням [2], заснованих на нових підходах до підвищення ефективності, впровадження сучасних інформаційних технологій, що в даний час є особливо актуальним.

**Огляд літератури.** У науково-технічній літературі системи запалювання авіаційних двигунів класифікуються як **ємнісні** та **індукційні** [3; 4]. Класифікація заснована на використанні відповідного накопичувача енергії. У системах запалювання ємнісного типу енергія накопичується у електричному полі накопичувальних конденсаторів, в індуктивних системах – у магнітному полі вібраційного перетворювача або трансформатора одноконтурного транзисторного перетворювача.

Рівень вихідної напруги визначає тип системи запалювання. За цією ознакою системи запалювання розподіляються на **високовольтні** та **низьковольтні**. В індуктивних системах запалювання використовують іскрові свічки. При цьому вихідна напруга змінюється в інтервалі 15-25 кВ. Індуктивні системи запалювання можуть бути низьковольтними; в них використовують свічки поверхневого розряду – ерозійні, напруга не перевищує 5-7 кВ. У ємнісних системах запалювання низьковольтного типу рівень робочих напруг складає 2,5-3,5 кВ. Вихідна напруга високовольтних ємнісних систем запалювання може перевищувати 20 кВ. Для ємнісних систем запалювання характерні, як правило, напівпровідникові свічки: відкриті, напівзакриті та стріляючі. Ці системи запалювання принципово можуть працювати і з іскровими свічками, надійний пробій яких забезпечується з використанням високовольтних імпульсних трансформаторів, в складі спеціальних блоків – активаторів.

У авіаційних двигунах різного призначення можуть використовуватися і інші типи електричних систем запалювання. Це – **плазмові**, **лазерні**, **п'єзоелектричні** та **калільні** [5]. Плазмові системи запалювання, на відміну від класичних імпульсних, створюють у плазмовій свічці безперервну дугу постійного або змінного струму [6]. Подібні системи запалювання потребують потужних джерел живлення для створення дуги, що безперервно горить. Перевагою плазмових систем є висока енергія [7], що виділяється, та значна протяжність плазмового викиду, що особливо важ-

ливо у випадках, коли у камері згоряння газотурбінного двигуна циркуляційна зона при висотному запуску змінює своє положення і робочий торець свічки може опинитись у зоні прямих високих швидкостей потоку. У цьому випадку плазмовий викид може досягти межі циркуляційної зони для забезпечення надійного займання суміші. Плазмові системи запалювання не знайшли широкого застосування у авіаційних двигунах. Порівняльні випробування плазмових та класичних ємнісних систем запалювання не показали значних переваг плазмових систем. Вочевидь, це пов'язано з тим, що швидкість виділення енергії у ємнісних системах запалювання імпульсного типу відчутно вище, що дуже важливо з точки зору займання паливо-повітряних сумішей на основі відомих теорій займання. Плазмові системи запалювання доцільно використовувати у газотурбінних приводах наземного застосування, де умови для займання суміші є достатньо комфортними. Такі системи запалювання використовують, наприклад, в газотурбінних двигунах газоперекачувальних агрегатів.

Калільні системи запалювання у авіаційних двигунах практичного використання не знаходять в силу низької швидкості підводу тепла до паливо-повітряної суміші.

Певні переваги мають лазерні системи запалювання. В цих системах лазерний промінь фокусується у потрібній точці камери згоряння, тим самим забезпечуючи високу надійність займання паливо-повітряної суміші, коли зі змінами тиску середовища (запуск в польоті), межі циркуляційної зони відрізняються від меж при наземному запуску двигунів. До очевидних недоліків лазерної системи може бути віднесено наявність оптичної системи, яка схильна до відкладень нагару при не повному згорянні палива. Відомі випадки використання лазерних систем запалювання в газотурбінних двигунах наземного застосування.

П'єзоелектричні системи запалювання використання у авіаційних двигунах не знаходять в силу малої енергії одиничного імпульсу. Однак ці системи запалювання можуть використовуватися у ракетних двигунах з невисокою потрібною величиною енергії для надійного займання високоефективної горючої суміші.

З усіх вищезгаданих систем запалювання в даний час у авіаційній галузі найбільш широке розповсюдження отримали **ємнісні системи запалювання з напівпровідниковими свічками**, які мають значні переваги над іншими системами, а саме можливість створення розрядних імпульсів великої енергії на свічках. Тому удосконалення саме ємнісних систем запалювання з використанням мікропроцесорного керування має найбільший практичний та прикладний інтерес.

Але використання вбудованої мікропроцесорної адаптивної системи керування системою запалювання у складі авіаційного газотурбінного двигуна має особливі вимоги до стійкості напівпровідникових елементів до зовнішніх факторів, що впливають: висока температурах (100...120 °С), вібрація (5...2000 Гц, з амплітудою до 1 мм), механічні удари (до 15g) та інші. Також особливі вимоги пред'являються до електромагнітної сумісності, а саме, стійкої роботи в умовах впливу електромагнітних полів високої інтенсивності - HIRF (частотою до 40 ГГц, напруженістю до 200 В/м).

**Методи.** Основним підходом до автоматизації системи запалювання має стати розробка ємнісних систем запалювання, параметрами роботи яких можна автоматично керувати у залежності від режимів та умов кожного конкретного запуску газотурбінного двигуна [8–19]. У цьому випадку необхідні параметри іскрових розрядів для надійного займання суміші, наприклад в умовах висотного запуску, задаються вбудованою мікропроцесорною адаптивною системою керування, яка аналізує та вибирає режими з оптимальними параметрами іскрових розрядів, що мають різні енергії, частоту слідування та тривалість.

Для адаптивного керування частотою іскроутворення необхідно розробити алгоритм, який виконує аналіз часу між послідовними розрядами, аналіз зовнішніх факторів, що впливають на швидкість формування розрядів та корегує швидкість накопичення енергії для формування чергового розряду у всіх можливих умовах експлуатації газотурбінного двигуна.

**Результати.** Удосконалення існуючих систем запалювання пов'язано з необхідністю підвищення їх займистої властивості для розширення меж пускових характеристик камер згоряння та пускових запальників.

Розробниками ємнісних систем запалювання ведеться постійна робота по їх вдосконаленню з метою підвищення показників якості для розширення меж пускових характеристик камер згоряння та пускових запальників, при цьому одночасно вирішуються завдання зниження маси, габаритів, споживаної потужності та збільшення ресурсних показників елементів системи запалювання двигунів. З точки зору вдосконалення систем запалювання певний науковий інтерес представляють наступні напрямки [20–24]:

**1. Використання ємнісних систем запалювання з одне полярним імпульсом (системи запалювання аперіодичного розряду).**

**2. Розробка імпульсно-плазмових систем запалювання, які за ефективністю близькі до ємнісних та плазмових систем.**

**3. Використання у системах запалювання «пакетного» режиму утворення іскрових роз-**

**рядів.** Цей режим роботи систем запалювання описаний у ряді наукових публікацій та може викликати певний інтерес.

**4. Використання розробок у сфері створення ємнісних систем запалювання з керованою черговістю іскрових розрядів.**

Ідея створення таких систем запалювання заснована на результатах дослідження процесів іскрового займання паливо-повітряних сумішей закордонними авторами.

**5. Розробка ємнісних систем з поєднанням у свічках іскрових розрядів різної тривалості.** Ефект від застосування іскрових розрядів різної тривалості широко використовується в індуктивних системах запалювання, в яких розряд у свічці містить коротку ємнісну та довгу індуктивну стадії розряду.

**6. Розробка та впровадження керованих систем запалювання, в яких параметри іскрових розрядів залежать від умов займання паливо-повітряних сумішей в різних умовах висотних запусків.**

**7. Удосконалення систем запалювання з підвищенням стабільності вихідних параметрів.**

Проаналізуємо зміст названих напрямків розвитку ємнісних систем запалювання.

На основі аналізу сучасних розробок в галузі удосконалення систем запалювання з одне полярним імпульсом (системи запалювання аперіодичного розряду) виявлені наступні особливості [20].

Котушка індуктивності, що підключена послідовно з напівпровідниковою свічкою, містить сердечник, що насичується та дозволяє отримати розрядний струм специфічної форми. По мірі збільшення струму сердечник насичується, що зменшує індуктивність дроселю та збільшує швидкість наростання струму. Такий характер змінення струму дозволяє досягти певних ефектів. По-перше, створюється ефективний захист напівпровідникового ключа – тиристор, який виконує роль комутуючого елементу. За рахунок малої швидкості зміни струму поблизу нульових значень, забезпечується захист тиристорного ключа. По-друге, при такій формі струму відбувається підвищення займистої здібності за рахунок зростання  $di/dt$  після насичення сердечника дроселя. Висока швидкість зростання струму забезпечує збільшення миттєвої потужності іскрових розрядів, що у відповідності до теплової теорії займання дозволяє підвищити надійність займання паливо-повітряної суміші. А малі швидкості зміни струму при переході струму через нуль знижують навантаження на напівпровідникову свічку, тим самим збільшуючи строк її служби та скорочуючи теплові втрати. Однак, при використанні дроселю, який забезпечує описаний вище закон зміни струму, виникає невідповідність між вимогою до зниження швидкості зростання струму для збіль-

шення строку експлуатації напівпровідникового ключа та вимогою до зростання струму для оптимального займання паливо-повітряної суміші, які дуже складно збалансувати.

Відомі роботи [21], в яких аналізуються процеси у системах запалювання, які мають одночасно переваги ємнісних та плазмових систем. Такі системи запалювання відносяться до імпульсно-плазмового типу. Головна відмінна особливість цих систем запалювання полягає в наступному: у свічці одночасно утворюються два розряди, кожний з яких утворюється конденсаторами різної ємності: при цьому основний конденсатор має велику ємність, але знижену напругу, недостатню для пробою свічки або розряднику. Поєднання короткого та довгого розрядів, як відомо, забезпечує підвищення займистої здатної свічки, так само, як це відбувається, наприклад, у високовольтних індуктивних системах запалювання двигунів внутрішнього згорання, де поєднуються ємнісний та індуктивний типи розрядів.

Недоліком цієї системи є те, що вона розрахована на роботу з іскровими свічками. Напівпровідникові свічки в подібних системах використовуватися не можуть, оскільки процес заряджання конденсатора великої ємності буде супроводжуватися великим струмом витоку через напівпровідниковий елемент.

Збільшення частоти слідування розрядів у свічці запалювання за певних умов запуску двигунів розглядається як один з можливих способів підвищення ефективності процесу займання. Зокрема, вказується на загальну перевагу високої частоти слідування розрядів у важких для займання умовах, коли склад паливо-повітряної суміші поблизу свічки запалювання далекий від оптимального. На основі цього ефекту в літературі описаний можливий спосіб підвищення ефективності ємнісних систем запалювання, що полягає в організації «пакетного» режиму генерування іскрових розрядів.

Важливим напрямком розвитку ємнісних систем запалювання є реалізація в розрядних ланцюгах послідовності іскрових розрядів; окрім того, створення систем, в яких у напівпровідникових свічках створюються іскрові розряди, що мають різну тривалість [22–24].

Перераховані вище способи вдосконалення систем запалювання мають багато традиційних електротехнічних схем реалізації, але **найбільш перспективним напрямком** є розробка ємнісних систем запалювання, параметрами роботи яких можна керувати [25] у залежності від режимів та умов кожного конкретного запуску газотурбінного двигуна. У цьому випадку необхідні параметри іскрових розрядів для надійного займання суміші, наприклад, в умовах висотного запуску,

задаються вбудованою мікропроцесорною адаптивною системою керування, яка аналізує та вибирає режими з оптимальними параметрами іскрових розрядів, що мають різні енергії, частоту слідування та тривалість.

Розробка та реалізація системи запалювання такого напрямку потребує:

1) поглибленого дослідження особливостей робочих процесів займання паливо-повітряної суміші у конкретних типах камер згорання та пускових запальників, що надасть розуміння базових параметрів процесу для створення ефективного алгоритму;

2) використання елементів апаратної частини системи запалювання (мікроконтролер, напівпровідникові елементи), що відповідають особливим вимогам до стійкості відносно зовнішнього впливу високої температури (100...120 °C), вібрації (5...2000 Гц, з амплітудою до 1 мм), механічних ударів (до 15g) та інші;

3) особливого конструктивного виконання корпусу та схемних рішень для забезпечення підвищених вимог до електромагнітної сумісності, а саме, стійкої роботи в умовах впливу електромагнітних полів високої інтенсивності – HIRF (частотою до 40 ГГц, напруженістю до 200 В/м).

Базова структурна схема системи запалювання з вбудованою мікропроцесорною адаптивною системою керування наведена на рис. 1.

Алгоритм адаптивного керування параметрами іскрових розрядів повинен виконувати наступні послідовні задачі:

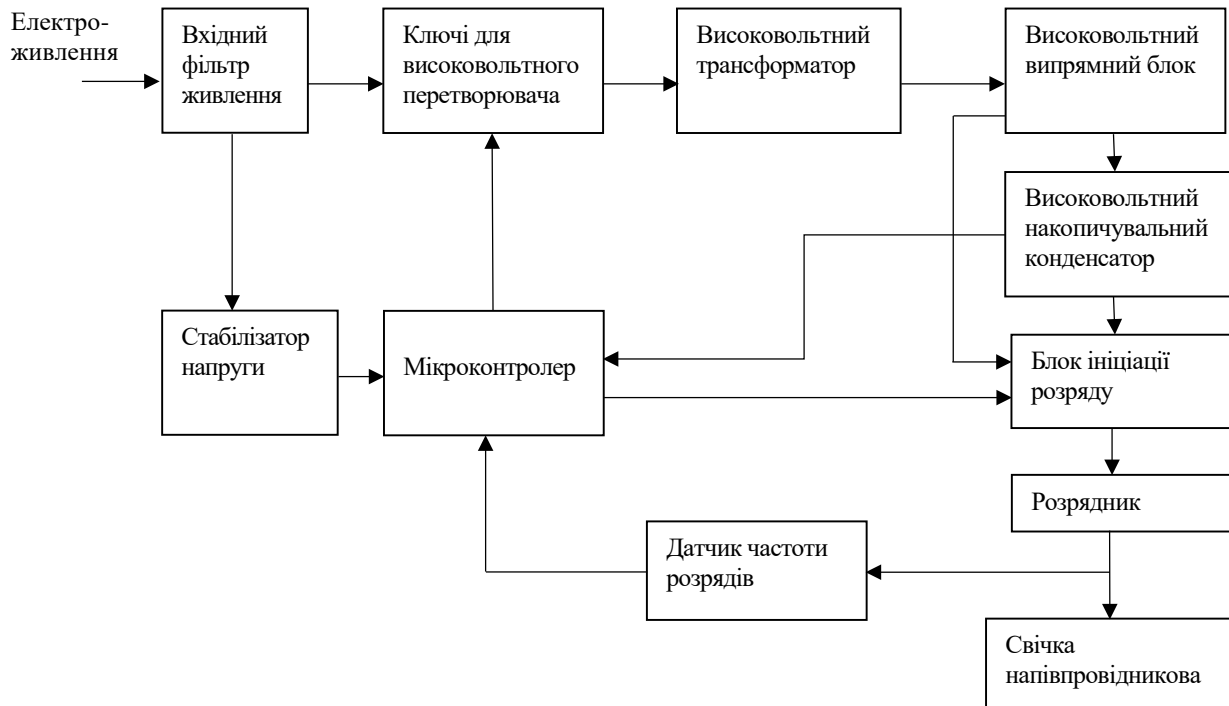
1) на початку запуску (вмикання електроживлення від системи автоматичного керування двигуна) перший проміжок часу (3 секунди) підтримувати постійну частоту іскрових розрядів 15 Гц напругою 3 кВ – режим тренування свічок;

2) наступні 20 секунд запуску підтримувати постійну частоту іскрових розрядів 15 Гц напругою 3 кВ – режим запалювання паливо-повітряної суміші;

3) якщо запуск двигуна не виконано (не вимкнено електроживлення від системи автоматичного керування двигуна) впродовж 20 секунд, виконати підвищення частоти іскроутворення до частоти 25 Гц з динамікою додавання частоти 1 Гц кожен наступну секунду запуску до 30-ї секунди запуску. Напругу розряду не змінювати (3 кВ);

4) якщо запуск двигуна не виконано (не вимкнено електроживлення від системи автоматичного керування двигуна) впродовж 30 секунд, виконати підвищення напруги розряду до 4 кВ з лінійною динамікою додавання напруги до 45-ї секунди. Частоту іскроутворення не змінювати (25 Гц).

5) після кожного запуску виконувати аналіз: тривалості запуску, часу між послідовними розрядами (за даними датчика частоти іскроутворення),



**Рис. 1. Структурна схема системи запалювання з вбудованою мікропроцесорною адаптивною системою керування**

величини напруги розряду (за даними з високовольтного накопичувального конденсатора) та за статистикою трьох наступних запусків при збільшенні тривалості часу запуску збільшувати початкову частоту іскроутворення та збільшувати динаміку підвищення напруги розряду за заданим законом. При зменшенні тривалості часу запуску зменшувати початкову частоту іскроутворення та зменшувати динаміку підвищення напруги розряду за заданим законом.

Враховуючи, що тривалість запуску залежить від умов експлуатації (висотність, температура, атмосферні опади, наявність нагару на свічці, ступінь вироблення свічки), описаний вище алгоритм дозволить автоматично адаптувати режим запуску до змін умов експлуатації. Такий підхід дозволить максимально ефективно використовувати ресурс свічки запалювання та всіх елементів високовольтного розрядного контуру та підвищити надійність запуску газотурбінного двигуна,

що є основними вимогами до вдосконалення сучасних систем запалювання.

**Висновки.** Наукова новизна проведеного дослідження полягає в тому, що запропоновано розробку принципово нової системи запалювання з мікропроцесорним адаптивним керуванням параметрами іскрових розрядів для оптимізації процесу запалювання авіаційних газотурбінних двигунів, якої ще не існувало у складі авіаційних двигунів в Україні та немає аналогічних розробок за кордоном (за інформацією з доступних відкритих джерел).

Імплементация та верифікація алгоритмів роботи нової системи запалювання з мікропроцесорним адаптивним керуванням параметрами іскрових розрядів буде виконуватись на дослідному зразку агрегату запалювання, який розробляється та буде виготовлений у рамках наукової роботи, як було вказано у завданні цього дослідження.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Кравченко І.Ф. Дослідження впливу параметрів пульсацій тиску у камері згоряння на стійкість роботи ГТД / І.Ф. Кравченко, В.М. Журавльов, С.А. Борзов. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. 2013. № 8. С. 136–141.
2. System and method for starting gas turbine engines: patent No. US 10,641,179 B2. МПК F02C 7/262, F05D 2220/32, F05D 2220/323, F05D 2260/85, F05D 2270/092, F05D 2220/3044; заяв. 07.11.2016; опубл. 05.05.2020.
3. Іноземцев А.А., Сандрацький В.Л. Газотурбінні двигуни: ВАТ «Авіадвигун», 2011. 1024 с.

4. Capacitive ignition system: patent No. US 10,815,955 B2. МПК F02P 1/08, F02P 11/02; заяв. 16.01.2013; опубл. 27.10.2020.
5. Торба Ю.І. Науково-технічні проблеми підвищення експлуатаційних та технічних характеристик двигунів для авіаційної техніки : Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України (Київ, 20 квітня 2022). *Вісн. НАН України*. 2022. № 6. С. 73–78.
6. Continuous plasma ignition system: patent No. 5,587,630. МПК H05B 37/02; заяв. 28.10.1993; опубл. 24.12.1996.
7. Plasma ignition and combustion assist for gas turbine engines: patent application publication No. US 2024/0159190 A1. МПК F02C 7/266, F23R 3/16; заяв. 18.03.2023; опубл. 16.05.2024.
8. Товкач С.С. Прогнозування міжелементної взаємодії в системах автоматичного керування авіаційних двигунів. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. 2018. № 8. С. 113–117.
9. Дмитрієв С.О. Перспективи використання автоматизованих систем діагностування газотурбінних двигунів на основі гібридних генетичних алгоритмів / С.О. Дмитрієв, О.В. Попов, В.Е. Потапов. *АВІА-2015*. Т.2, 2015. С. 20.46-20.49.
10. Товкач С.С. Гібридний генетичний підхід до побудови розподіленої системи автоматичного керування авіаційних двигунів. *Вісник двигунобудування*. 2019. № 2. С. 57–62.
11. Панін В.В., Єнчев С.В., Товкач С.С. Комбіновані моделі обробки інформації в електронних системах керування авіаційних двигунів. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. 2013. № 8. С. 235–239.
12. Єнчев С.В., Таку С.О. Розробка адаптивного нейромережевого регулятора інтелектуальної системи керування авіаційним двигуном. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. № 6. Т. 29(68). С. 34–39.
13. Y. Gao, S. Wang, T. Dragicevic, P. Wheeler. Artificial intelligence techniques for enhancing the performance of controllers in power converter-based systems – an overview. *IEEE Open Journal of Industry Applications*. 2023 Volume 4. С. 366–375.
14. S. Zhao, F. Blaabjerg, H. Wang. An overview of artificial intelligence applications for power electronics. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2021 vol. 36, no. 4. С. 4633–4658.
15. J. Liu, T. Wei, N. Chen, W. Liu, J. Wu, P. Xiao. A neural network PID controller with dynamic structure adjustment for DC-DC switching converters // in Proc. IEEE 7<sup>th</sup> Int. Conf. Integr. Circuits Microsystems, 2022. С. 356–360.
16. M. Jafari, Z. Malekjamshidi. Design, simulation and implementation of an adaptive controller on base of artificial neural networks for a resonant DC-DC converter // in Proc. IEEE 9<sup>th</sup> Int. Conf. Power Electron. Drive Syst., 2011, С. 1043–1046.
17. J. Liu, T. Wei, N. Chen, W. Liu, J. Wu, P. Xiao. Fuzzy logic PID controller with both coefficient and error modifications for digitally-controlled DC-DC switching converters. *J. Elect. Eng. Technol.*, 2023, vol. 18, С. 2859–2870.
18. S. Hou, Y. Chu, J. Fei. Robust intelligent control for a class of power-electronic converters using neuro-fuzzy learning mechanism. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2021, vol. 36, no. 8, С. 9441–9452.
19. H. S. Krishnamoorthy, T. N. Aayer. Machine learning based modeling of power electronic converters // in Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo., 2019, С. 667–672.
20. Ignition system for a turbine engine: patent No. 5,561,350. МПК H05B 39/02; заяв. 24.02.1995; опубл. 01.10.1996.
21. Dual ignition system for a gas turbine engine: patent No.US 7,509,812 B2. МПК F02C 7/22; заяв. 20.08.2004; опубл. 31.03.2009.
22. Aircraft engine ignition system: patent No. 5,257,500. МПК F02C 7/264; заяв. 27.06.1992; опубл. 02.11.1993.
23. Ignition system for a gas turbine engine: patent No.US 7,595,568 B2. МПК H02J 9/00, H02J 3/38, F23Q 3/00; заяв. 16.02.2007; опубл. 29.09.2009.
24. Turbine engine ignition system and method: patent No. US 11,519,335 B1. МПК F02C 7/26, F02C 7/266, H01F 38/12, F02P 15/00; заяв. 27.08.2021; опубл. 06.12.2022.
25. Ignition system and method of programming an ignition system: patent No. US 6,339,743 B1. МПК G06G 7/70; заяв. 24.02.2000; опубл. 15.01.2002.

## REFERENCES

1. Kravchenko I.F. (2013) Doslidzhennya vplyvu parametriv pulsatsiy tysku u kameri zhoryannya na stiykist roboty GTD [Study of the influence of pressure pulsation parameters in the combustion chamber on the stability of the gas turbine engine] *Aviatsiyno-kosmychna tekhnika ta tekhnolohiya*, no. 8, pp. 136-141. (in Ukrainian)

2. System and method for starting gas turbine engines: patent US 10,641,179 B2. Int. Cl. F02C 7/262, F05D 2220/32, F05D 2220/323, F05D 2260/85, F05D 2270/092, F05D 2220/3044; filed 07.11.2016; date of patent 05.05.2020.
3. Inozemtsev A.A., Sandratskiy V.L. (2011) Gazoturbinni dvyguny [Gas turbine engines]: VAT «Aviadvygun», 1024 p.
4. Capacitive ignition system: patent No. US 10,815,955 B2. Int. Cl. F02P 1/08, F02P 11/02; filed 16.01.2013; date of patent 27.10.2020.
5. Yu. I. Torba (2022) Scientific and technical problems of improving the operational and technical characteristics of aircraft engine : Transcript of the report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, April 20, 2022. Visn. Nac. Acad. Nauk Ukr, (6). pp. 73-78.
6. Continuous plasma ignition system: patent No. 5,587,630. Int. Cl. H05B 37/02; filed 28.10.1993; date of patent 24.12.1996.
7. Plasma ignition and combustion assist for gas turbine engines: patent application publication No. US 2024/0159190 A1. Int. Cl. F02C 7/266, F23R 3/16; filed 18.03.2023; pub. Date 16.05.2024.
8. Tovkach S.S. (2018) Prohnozuvannia mizhelementnoi vzaimodii v systemakh avtomatychnoho keruvannia aviatsiinykh dvyhuniv [Prediction of the interelement interaction in the automatic control systems of aviation engines] *Aviatsiyno-kosmychna tekhnika ta tekhnolohyia*, no. 8, pp. 113-117.
9. Dmytriiev S.O., Popov O.V., Potapov V.E. (2015) Perspektyvy vykorystannia avtomatyzovanykh system diahnostuvannia hazoyurbinykh dvyhuniv na osnovi hibrydnykh henetychnykh alhorytmiv [Prospects for automated automation systems for gas turbine engines using new hybrid genetic algorithms]. *AVIA-2015*, issue 2, pp. 20.46-20.49.
10. Tovkach S.S. (2019) Hibrydny henetychny pidhid do pobudovy rozpodilenoj systemy avtomatychnoho keruvannia aviatsiinykh dvyhuniv [Hybrid genetic approach for building the distributed automatic control system of aviation engines]. *Visnyk dvyhunobuduvannia*, no. 2, pp. 57-62.
11. Panin V.V., Yenchev S.V., Tovkach S.S. (2013) Kombinovani modeli obrobky informatsii v elektronnykh systemah keruvannia aviatsiinykh dvyhuniv [Combined models of information processing in electronic control systems of aircraft engines]. *Aviatsiyno-kosmychna tekhnika ta tekhnolohyia*, no. 8, pp. 235-239.
12. Yenchev S.V., Taku S.O. (2018) Rozrobka adaptivnoho neyromerezhevoho rehulyaitora intelektualnoi systemy keruvannia aviatsiinym dvyhunom [Development of an adaptive neural network controller for an intelligent aircraft engine control system]. *Vcheni zapysky Tavriyskoho natsionalnogo universytetu imeni V.I. Vernadtskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*, no. 6, issue 29(68), pp. 34-39.
13. Yuan Gao, Songda Wang, Tomislav Dragicevic, Patrick Wheeler. (2023) Artificial intelligence techniques for enhancing the performance of controllers in power converter-based systems – an overview // *IEEE Open Journal of Industry Applications*. Volume 4, pp. 366-375.
14. S. Zhao, F. Blaabjerg, H. Wang. (2021) An overview of artificial intelligence applications for power electronics // *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 4, pp. 4633-4658.
15. J. Liu, T. Wei, N. Chen, W. Liu, J. Wu, P. Xiao. (2022) A neural network PID controller with dynamic structure adjustment for DC-DC switching converters // in *Proc. IEEE 7<sup>th</sup> Int. Conf. Integr. Circuits Microsystems*, pp. 356-360.
16. M. Jafari, Z. Malekjamshidi (2011) Design, simulation and implementation of an adaptive controller on base of artificial neural networks for a resonant DC-DC converter // in *Proc. IEEE 9<sup>th</sup> Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, pp. 1043-1046.
17. J. Liu, T. Wei, N. Chen, W. Liu, J. Wu, P. Xiao. (2023) Fuzzy logic PID controller with both coefficient and error modifications for digitally-controlled DC-DC switching converters // *J. Elect. Eng. Technol.*, vol. 18, pp. 2859-2870.
18. S. Hou, Y. Chu, J. Fei. (2021) Robust intelligent control for a class of power-electronic converters using neuro-fuzzy learning mechanism // *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 8, pp. 9441-9452.
19. H. S. Krishnamoorthy, T. N. Aayer. (2019) Machine learning based modeling of power electronic converters // in *Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, pp. 667-672.
20. Ignition system for a turbine engine: patent No. 5,561,350. Int. Cl. H05B 39/02; filed 24.02.1995; date of patent 01.10.1996.
21. Dual ignition system for a gas turbine engine: patent No. US 7,509,812 B2. Int. Cl. F02C 7/22; filed 20.08.2004; date of patent 31.03.2009.
22. Aircraft engine ignition system: patent No. 5,257,500. Int. Cl. F02C 7/264; filed 27.06.1992; date of patent 02.11.1993.
23. Ignition system for a gas turbine engine: patent No. US 7,595,568 B2. Int. Cl. H02J 9/00, H02J 3/38, F23Q 3/00; filed 16.02.2007; date of patent 29.09.2009.
24. Turbine engine ignition system and method: patent No. US 11,519,335 B1. Int. Cl. F02C 7/26, F02C 7/266, H01F 38/12, F02P 15/00; filed 27.08.2021; date of patent 06.12.2022.
25. Ignition system and method of programming an ignition system: patent No. US 6,339,743 B1. Int. Cl. G06G 7/70; filed 24.02.2000; date of patent 15.01.2002.

УДК 004.67:629.7  
DOI <https://doi.org/10.26661/2786-6254-2024-2-04>

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ НАЯВНОСТІ ГОРІННЯ ПАЛИВО-ПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ У ФОРСАЖНІЙ КАМЕРІ ЗГОРЯННЯ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

**Виганяйло Я. М.**

*аспірант*

*Запорізький національний університет  
вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна  
[orcid.org/0009-0007-2478-6633](https://orcid.org/0009-0007-2478-6633)  
[yaroslav.m.m.m.77@gmail.com](mailto:yaroslav.m.m.m.77@gmail.com)*

**Шило Г. М.**

*доктор технічних наук,*

*завідувач кафедри комп'ютерних наук  
Запорізький національний університет  
вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна  
[orcid.org/0000-0002-5020-6707](https://orcid.org/0000-0002-5020-6707)  
[shilo.gn@gmail.com](mailto:shilo.gn@gmail.com)*

**Ключові слова:** форсажна камера згоряння, газотурбінний двигун, полум'я, іонізаційний струм, пульсації провідності, мікроконтролерна система.

У статті наведено огляд існуючих систем і методів визначення наявності полум'я у форсажній камері згоряння (ФКЗ) авіаційних газотурбінних двигунів. Дана їх класифікація за принципом дії. Надано розгорнутий опис основних властивостей та аналіз особливостей кожної системи. Зазначена необхідність удосконалення відомих на даний час систем визначення наявності полум'я в ФКЗ у зв'язку з потребою в підвищенні точності та швидкодії виявлення горіння паливо-повітряної суміші у форсажній камері згоряння у всьому висотно-швидкісному діапазоні експлуатації газотурбінного двигуна.

Описані особливості конструкції ФКЗ, що розроблюють українські двигунобудівники, та пояснено, чому неможливо використовувати відомі та традиційні методи визначення наявності полум'я для такої конструкції ФКЗ. Зроблено висновок, що існуючі способи визначення наявності полум'я мають обмеження по можливості застосування та значну ймовірність помилкових спрацювань, тому існує необхідність у розробці нового методу та алгоритмів для надійного визначення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ. Визначений найбільш перспективний напрям розвитку систем і методів визначення наявності полум'я в ФКЗ – аналіз стану середовища у ФКЗ за допомогою мікропроцесорної техніки, використовуючи такі властивості полум'я, як електропровідність, за рахунок наявності іонів та радикалів, та наявність пульсацій провідності у певних спектрах частот за рахунок протікання окисно-відновних реакцій. Описані основні задачі алгоритму з аналізу стану середовища в ФКЗ за параметрами іонізаційного струму між іонізаційними зондами (корпусним та сигнальним), встановленими в ФКЗ. Запропоновано структурну схему нової мікроконтролерної системи виявлення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ. Мікроконтролерна система за величиною іонізаційного струму корегує коефіцієнт підсилення сигналу від іонізаційних зондів, аналізує спектр сигналу по частоті та за отриманими даними формує сигнал про наявність чи відсутності горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ.

# RESEARCH OF METHODS AND ALGORITHMS FOR AUTOMATIC DETECTION OF THE PRESENCE OF COMBUSTION OF THE FUEL-AIR MIXTURE IN THE AFTERBURNER COMBUSTION CHAMBER OF GAS TURBINE ENGINES

**Vyhaniailo Ya. M.**

*Postgraduate Student*

*Zaporizhzhia National University*

*Universytetska str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine*

*orcid.org/0009-0007-2478-6633*

*yaroslav.m.m.m.77@gmail.com*

**Shilo G. M.**

*Doctor of Technical Sciences,*

*Head of the Department of Computer Science*

*Zaporizhzhia National University*

*Universytetska str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine*

*orcid.org/0000-0002-5020-6707*

*shilo.gn@gmail.com*

**Key words:** *afterburner combustion chamber, gas turbine engine, flame, ionization current, conductivity pulsations, microcontroller system.*

The article provides an overview of the existing systems and methods for detecting the presence of flame in the afterburner combustion chamber (ACC) of aircraft gas turbine engines. They are classified by the operating principle. A detailed description of the main properties and analysis of the features of each system are presented. The need to improve the currently known systems for detecting the presence of flame in the ACC is indicated in connection with the need to increase the accuracy and speed of detecting the combustion of the fuel-air mixture in the ACC in the entire altitude-speed range of gas turbine engine operation. The design features of the ACC, which are being developed by Ukrainian engine builders, are described, and it is explained why it is impossible to use known and traditional methods of determining the presence of flame for such ACC design. It is concluded that the existing methods for detecting the presence of flame have limitations in the possibility of application and a significant probability of erroneous responses, so there is a need to develop a new method and algorithms for reliable detection and control of the combustion of the fuel-air mixture in the ACC. The most promising direction of development of systems and methods for determining the presence of flame in the ACC is determined. This is the analysis of the state of the environment in the ACC using microprocessor technology, using such flame properties as electrical conductivity due to the presence of ions and radicals, and the presence of conductivity pulsations in certain frequency spectra due to the occurrence of oxidation-reduction reactions. The main tasks of the algorithm for analyzing the state of the environment in the ACC based on the parameters of the ionization current between the ionization probes (housing and signal) installed in the ACC are described. A structural diagram of a new microcontroller system for determining and monitoring combustion of the fuel-air mixture in the ACC is proposed. The microcontroller system adjusts the gain factor of the signal from the ionization probes based on the ionization current value исследование, analyzes the signal spectrum by frequency, and, based on the data received, generates a signal about the presence or absence of combustion of the fuel-air mixture in the ACC.



**Вступ.** В даний час на світовому ринку є великий попит на сучасні учбово-тренувальні та легкі бойові літаки (УТЛ та ЛБЛ), оскільки використовували раніше реактивні літаки для підготовки льотного складу за тактико-технічними характеристиками поступаються бойовим літкам. Відповідно, завдання створення сучасних та високоефективних двигунів для УТЛ та ЛБЛ є актуальним та затребуваним. Тому велику перспективу та особливий інтерес для авіаційної промисловості та усієї авіаційної галузі України становить створення сімейства двигунів для УТЛ та ЛБЛ [1]. Дане сімейство включає в себе, також, турбореактивні двоконтурні двигуни з форсажною камерою згоряння (ТРДДФ). Форсовані ТРДД (ТРДДФ) мають переваги перед нефорсованими у розширеному діапазоні застосування за висотами та швидкостями польоту. Проблема створення алгоритмів виявлення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ [2–4] є новою для українських двигунобудівників. Це і визначає актуальність і необхідність виконання відповідних досліджень методів визначення наявності полум'я у ФКЗ. Тому **предметом** дослідження і стали системи і методи визначення наявності полум'я у форсажній камері згоряння (ФКЗ) авіаційних газотурбінних двигунів. **Метою** дослідження є необхідність удосконалення відомих на даний час систем визначення наявності полум'я в ФКЗ у зв'язку з потребою в підвищенні точності та швидкодії виявлення горіння паливо-повітряної суміші у форсажній камері згоряння у всьому висотно-швидкісному діапазоні експлуатації газотурбінного двигуна. Для вирішення існуючих потреб українських двигунобудівників найбільш ефективним є використання сучасних інструментів і методів з області комп'ютерних наук, а саме - розробка нового методу та алгоритмів для надійного визначення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ з використанням мікропроцесорної техніки, що і становить головне **завдання** цього дослідження.

**Огляд літератури.** Для рішення завдання виявлення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ існують різноманітні за принципом дії датчики та системи [5–9]:

**1. Електроіонізаційні датчики** [10–19], що розташовуються у зоні стабілізаторів горіння. Спосіб формування сигналу заснований на детектуванні іонізаційного струму, що протікає між іонізаційним зондом датчика та корпусом ФКЗ. Недоліком засобу є необхідність частково виключити охолодження корпусу ФКЗ для забезпечення можливості протікання іонізаційного струму, що призводить до інтенсивного зносу та зниження ресурсних показників ФКЗ.

## **2. Оптичні датчики** [20–25]:

1) **диференційний спосіб** реєстрації теплового випромінювання продуктів згоряння (без обмеження спектрального діапазону), до та за стабілізаторами горіння. Однак при сучасних високоентальпійних режимах роботи основних камер згоряння та застосування малих режимів у форсажних камерах згоряння відмінності реєстрованих інтегральних випромінювань незначні та надійність цього способу недостатня;

2) **детектор полум'я**, в якому використовується фотоприймач на основі гетероструктури GaAsP з чутливістю до ультрафіолетового випромінювання, щоб зменшити вплив інфрачервоного випромінювання. Такий детектор добре сприймає вказане вище випромінювання, що характеризує зону горіння. Однак специфіка роботи ФКЗ у польоті припускає можливість потрапляння променів сонця у реактивне сопло. При цьому датчик полум'я видасть помилковий сигнал про наявність горіння в камері згоряння;

3) **датчик на основі газорозрядного фотоелементу**, спектр чутливості якого лежить у інтервалі 180...300 нм. Однак процеси, що характеризують горіння, супроводжуються локальним випромінюванням радикалів OH (308-320 нм), CN (431-438 нм), C<sub>2</sub> (467-470 нм; 513-516 нм) при хемілюмінесценції у хімічних реакціях окислення вуглеводневого пального. Тому чутливість пристрою для виявлення горіння у відомому способі низька.

**3. Система контролю наявності полум'я у ФКЗ за параметрами вібрації двигуна** [26–36]. За основу методу взята технологія пікового усереднення сигналу датчика вібрації, що дозволяє виділити ознаки наявності полум'я на форсованих режимах роботи газотурбінних двигунів навіть датчиками вібрації достатньо віддаленими від ФКЗ. При цьому виявляється не менше ніж на 13 дБ підвищення потужності шуму віброприскорення над нефорсованими режимами.

Основним частотним діапазоном, в районі якого найбільш характерно виявляються ознаки наявності полум'я в ФКЗ, є діапазон частот у районі 6,4 кГц з шириною полоси від 80 Гц до 250 Гц у залежності від місця та напрямку зміни вібрації. У цій полосі частот максимальні потужності випадкового віброприскорення на форсованих режимах на усіх датчиках вібрації двигуна зростають на 9-21 дБ.

Найбільш чутливим до наявності полум'я у ФКЗ виявляється вимірювання вібрації в осьовому напрямку, у якому максимальні потужності випадкового віброприскорення підвищуються більш ніж на порядок або на 21 дБ.

Включення ФКЗ підвищує потужність шуму віброприскорення на жаровій трубі основної

камери згоряння (ОКЗ) на навколо нульових частотах, що може свідчити про суттєве підвищення рівня випадкового вібропереміщення, величина якого при однаковому рівні віброприскорення зворотно пропорційна частоті коливань.

Момент розпалювання ФКЗ характеризується проходженням зворотної хвилі тиску, що призводить до різкого гальмування ротору низького тиску (НД) розмахом до 3000 об/хв/с після попереднього розгону до 1200-1800 об/хв/с, викликаного попереднім розкриттям сопла та визначається за максимумом прискорення роторів, що відповідає точці перегину трендів частот обертання.

Момент згасання ФКЗ характеризується проходженням зворотної хвилі розрідження, що характеризується гальмуванням ротору НД розмахом до 3000 об/хв/с з попереднім прискоренням до 600 об/хв/с.

Незважаючи на наявність характерних ознак, що відповідають процесу горіння ФКЗ, у описаного метода є основний та принциповий недолік: аналіз стану середовища в ФКЗ (наявність або відсутність полум'я) ведеться за непрямими ознаками (вібрація двигуна) і знаходиться в області шумів сигналу або випадкових віброприскорень та вібропереміщень. Визначити такі характерні ознаки процесу горіння ФКЗ можливо лише при стендових випробуваннях двигуна, але при роботі двигунів у складі літака причиною таких шумів сигналу або випадкових віброприскорень та вібропереміщень можуть бути: робота сусіднього двигуна або робота літакових систем, наприклад, використання озброєння, що призведе до помилкових визначень наявності полум'я. Тому навіть розробники методу рекомендують використання його у комбінації з основною системою визначення наявності полум'я на іонізаційній основі.

Враховуючи, що у існуючих способів визначення наявності полум'я є обмеження по можливості застосування та значна ймовірність помилкових спрацювань, існує необхідність у розробці нового методу та алгоритмів для надійного визначення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ.

### **Перспективи розвитку систем, методів та алгоритмів визначення наявності полум'я в ФКЗ**

Необхідність удосконалення відомих на даний час систем визначення наявності полум'я в ФКЗ викликано потребою в підвищенні точності та швидкодії виявлення горіння паливо-повітряної суміші у форсажній камері згоряння у всьому висотно-швидкісному діапазоні експлуатації газотурбінного двигуна.

ТРДДФ, що розробляються українськими двигунобудівниками, мають особливості конструкції ФКЗ [1, 2]. А саме для виключення умов, що при-

зводять до віброгоріння (шкідливе явище, що руйнує елементи ФКЗ), до конструкції вводяться демпфуючі отвори у екранах ФКЗ. При цьому повітря з-за компресору через ці отвори обдуває стінки екрану. Холодне повітря створює граничний шар з діелектричним характером, який не дозволяє використати відомий та описаний вище метод детектування. У зв'язку з цим розробка принципу та відповідного методу виявлення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ є актуальною.

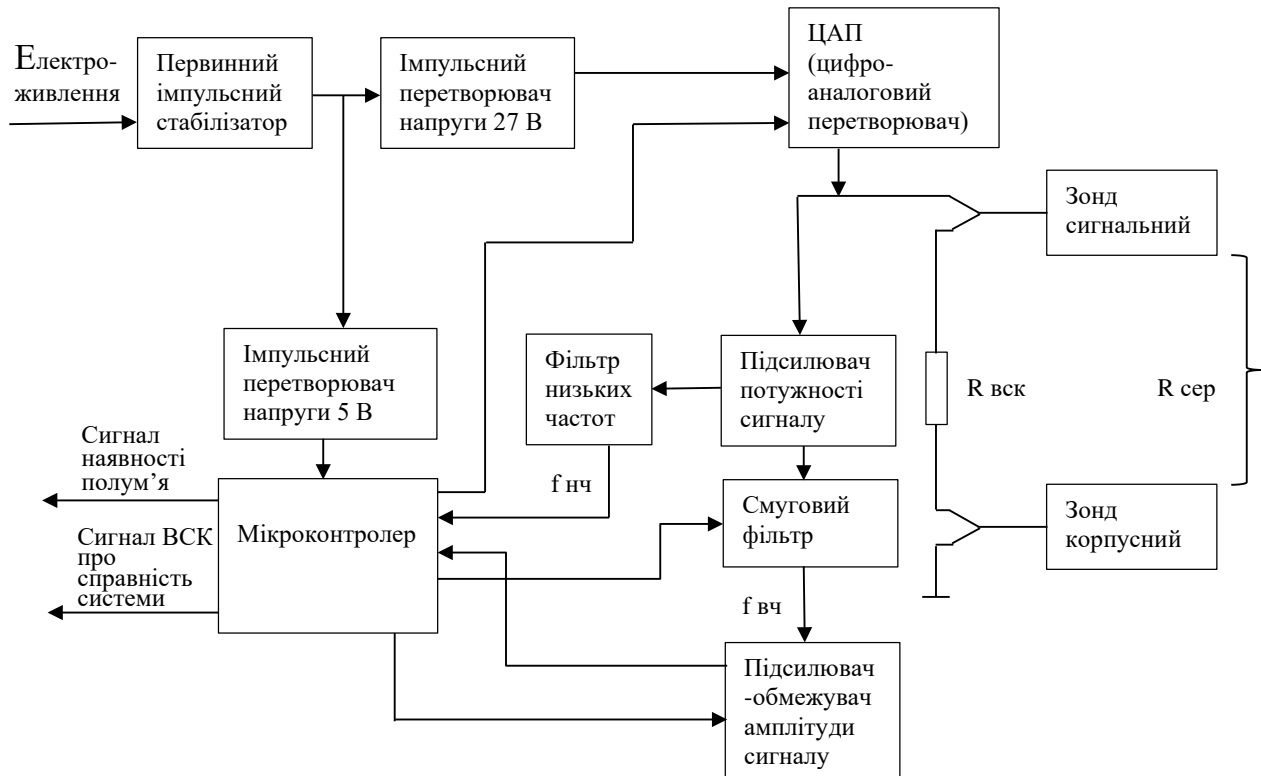
### **Методи**

**Найбільш перспективним та достовірним напрямком** у даному випадку є розробка методу та алгоритму для аналізу з використанням мікропроцесорної техніки, стану середовища у ФКЗ, а саме комбінації таких характерних властивості полум'я, як електропровідність, за рахунок наявності іонів та радикалів, та наявності пульсацій провідності у певних спектрах частот за рахунок протікання окисно-відновних реакцій.

**Результати.** Структурна схема мікроконтролерної системи виявлення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ на основі аналізу стану середовища наведена на рис. 1.

Аналіз стану середовища в ФКЗ пропонується виконувати автоматично мікроконтролерною системою, що вимірює іонізаційний струм між іонізаційними зондами (корпусним та сигнальним), встановленими в ФКЗ, за величиною струму корегує коефіцієнт підсилення сигналу від іонізаційних зондів, аналізує спектр сигналу по частоті та за отриманими даними формує сигнал про наявність чи відсутність горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ. А для взаємодії з системою контролю та діагностики основної системи автоматичного керування двигуна формується сигнал про справність апаратної частини системи виявлення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ, що складається з діагностики відсутності обривів та коротких замикань у лініях зв'язку з іонізаційними зондами, у ланцюгах електроживлення та у внутрішніх ланцюгах елементів системи. Первинний імпульсний стабілізатор, імпульсні перетворювачі напруги 5 В та 27 В забезпечують необхідну якість живлення для мікроконтролера та функціональних вузлів обробки сигналу від іонізаційних зондів: фільтри низькочастотних та високочастотних складових сигналу, підсилювачі потужності та амплітуди сигналів. ЦАП призначений для підтримки максимальної чутливості роботи смугового фільтру.

Розробка та реалізація системи визначення наявності полум'я в ФКЗ такого напрямку потребує поглибленого дослідження особливостей середовища у ФКЗ при наявності або відсутності полум'я.



**Рис. 1. Структурна схема мікроконтролерної системи виявлення та контролю горіння паливо-повітряної суміші у ФКЗ**

$f_{нч}$  – низькочастотна складова сигналу від зондів;  $f_{вч}$  – високочастотна складова сигналу від зондів;  $R_{вск}$  – резистор вбудованої системи контролю (ВСК);  $R_{сер}$  – електричний опір середовища між зондами.

**Висновки.** Наукова новизна проведеного дослідження полягає в тому, що запропоновано розробку нового методу та алгоритму з використанням мікропроцесорної техніки для аналізу стану середовища у ФКЗ, описані основні задачі алгоритму з аналізу стану середовища в ФКЗ за параметрами іонізаційного струму між іонізаційними зондами (корпусним та сигнальним), встановленими в ФКЗ, та запропонована структурна схема основних функціональних вузлів для апаратної реалізації.

Цей метод принципово новий та призначений саме для ФКЗ розробки українських двигунобудівників, що мають особливості конструкції. Тому запропонований метод та алгоритми не можуть бути порівняні з існуючими та вищеописаними методами визначення наявності полум'я у ФКЗ.

В подальшій перспективі передбачена розробка та виготовлення дослідного зразка електронного блоку з такими функціями для використання у складі газотурбінного двигуна.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Кравченко І.Ф. Формування параметричного обліку та конструктивної схеми ТРДД для УТЛ-ЛБЛ. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. 2011. № 9(86). С. 7–12.27.
2. Єпіфанов С.В., Кузнецов Б.І., Богаєнко В.І. Синтез систем управління та діагностування газотурбінних двигунів. Київ : Техніка. 1998. 312 с.
3. Кіслов О.В., Шевченко М.А. Особливості розрахунку та регулювання двоконтурного турбореактивного двигуна з форсажною камерою згоряння в зовнішньому контурі в прямоточному режимі роботи. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. 2020. № 6(166). С. 15–23.
4. Chen Y., Fan Y., Bai X.S., Xu L., Shan X., Bi Y. Experimental study on combustion and flow resistance characteristics of an afterburner with air-cooled bluff-body flameholder. *Aerospace Science and Technology*. 2022. Т. 123. С. 107488.
5. Іноземцев А.А., Сандрацький В.Л. Газотурбінні двигуни / ВАТ «Авіадвигун», 2011. 1024 с.

6. Герасименко В.П. Теорія авіаційних двигунів : підручник. Харків : Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т». 2003. 199 с.
7. Docquier N., Candel S. Combustion control and sensors: A review. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2002. № 28. С. 107–150.
8. Ballester J., Garcia-Armingol T. Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2010, № 36. С. 375–411.
9. Bader A., Bellovich J. Pilot, ignition and monitoring systems / The John Zink Hamworthy Combustion Handbook. 2013. 2-е изд. Boca Raton, USA. С. 299–306.
10. Xu H., Fan W., Feng J., Yan P., Qi S., Zhang R. Parameter Determination and Ion Current Improvement of the Ion Current Sensor Used for Flame Monitoring. *Sensors*. 2021. 21. 697.
11. Chang L., Cao Z., Fu B., Lin Y., Xu L. Lean blowout detection for bluff-body stabilized flame. *Fuel*. 2020. № 266. 117008.
12. Li F., Xu L., Du M., Yang L., Cao Z. Ion current sensing-based lean blowout detection for a pulse combustor. *Combust. Flame*. 2017. № 176. С. 263–271.
13. Ding Y., Durox D., Darabiha N., Schuller T. Combustion state monitoring of premixed heating appliances with flame ionization current and chemiluminescence. *Combust. Sci. Technol.* 2018. № 191. С. 382–401.
14. Yan Y., Wang L., Qian X., Zhang W., Reda K., Wu J., Zheng G. Electrostatic sensors – Their principles and applications. *Measurement*. 2021. 169. 108506.
15. Gardiner D.P., Pucher G., Allan W.D., La Violette M. Flame-Out Detection for Gas Turbine Engines Based upon Thermocouple Signal Analysis. In *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air*. Barcelona, Spain. 6-11 May 2006. С. 777–783.
16. Rolando A., D'Alessio A., D'Anna A., Allouis C., Beretta F., Minutolo P. Measurement of particulate volume fraction in a coflow diffusion flame using transient thermocouple technique. *Combust. Sci. Technol.* 2004. № 176. С. 945–958.
17. Strandh P., Christensen M., Bengtsson J., Johansson R., Vressner A., Tunestal P., Johansson B. Ion Current Sensing for HCCI Combustion Feedback. In *Proceedings of the Powertrain and Fluid Systems Conference and Exhibition*. Pittsburgh, USA. 27-30 October 2003. SAE International: Pittsburgh, USA. 2003.
18. Yoshiyama S., Tomita E. Combustion Diagnostics of a Spark Ignition Engine Using a Spark Plug as an Ion Probe. In *Proceedings of the Powertrain and Fluid Systems Conference and Exhibition*. San Diego, USA. 21-24 October 2002. SAE International: San Diego, USA. 2002.
19. Chorpening B.T., Thornton J.D., Huckaby E.D., Benson K.J. Combustion oscillation monitoring using flame ionization in a turbulent premixed combustor. *J. Eng. Gas. Turbines Power*. 2006. № 129. С. 352–357.
20. Tang Q., Liu H., Li M., Yao M., Li Z. Study on ignition and flame development in gasoline partially premixed combustion using multiple optical diagnostics. *Combust. Flame*. 2017. № 177. С. 98–108.
21. Liu C., Cao Z., Lin Y., Xu L. Flame monitoring of a model swirl injector using 1D tunable diode laser absorption spectroscopy tomography. *Meas. Sci. Technol.* 2017. № 28. 054002.
22. Hariharan V., Mishra D. P. Dynamic flame stability diagnosis of inverse jet flame using CH\* chemiluminescence. *Fuel*. 2021. № 285. 119277.
23. Tsai C.F., Young M.S. Measurement system using ultraviolet and multiband infrared technology for identifying fire behavior. *Rev. Sci. Instrum.* 2006. № 77. 014901.
24. Xu L., Liu C., Jing W., Cao Z., Xue X., Lin Y. Tunable diode laser absorption spectroscopy-based tomography system for on-line monitoring of two-dimensional distributions of temperature and H<sub>2</sub>O mole fraction. *Rev. Sci. Instrum.* 2016. № 87. 013101.
25. Muruganandam T., Nair S., Neumeier Y., Lieuwen T., Seitzman J. Optical and Acoustic Sensing of Lean Blowout Precursors. In *Proceedings of the 38<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*. Indianapolis, USA. 7-11 July 2002.
26. Журавльов В.М., Торба Ю.І, Павленко Д.В. Дослідження параметрів процесу включення форсажної камери згоряння ГТД. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. 2022. № 3(179). С. 30–36.
27. Schulz C., Dreizler A., Ebert V., Wolfrum J. Combustion diagnostics. *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Berlin: 2007. С. 1241–1315.
28. Khosravy el Hossaini M. Review of the New Combustion Technologies in Modern Gas Turbines. *Progress in Gas Turbine Performance*. Intech Open. 2013. С. 16.
29. Z. Wang, N. Zhao, W. Wang, R Tang, S. Li. A fault diagnosis approach for gas turbine exhaust gas temperature base on fuzzy c-means clustering and support vector machine. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. Vol. 2015.
30. Afgan N.H., Carvalho M.G., Pilavachi P.A., Tourlidakis A., Olkhonski G.G., Martins N. An expert system concept for diagnosis and monitoring of gas turbine combustion chambers. *Applied Thermal Engineering*. 2006. Vol. 26. С. 766–771.

31. Mauricio A., Helm D., Timusk M., Antoni J., Gryllias K. Novel cyclo-nonstationary indicators for monitoring of rotation machinery operating under speed and load varying conditions. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2022. Vol. 144. C. 24–40.
32. Лозня С.В., Некрасов С.С., Соляник В.Г., Торхов М.І., Френев О.В., Якунін В.М. Застосування засобів вібраційної діагностики для захисту від вібраційного горіння. *Вібрації у техніці та технологіях*. 2001. № 4(20). С. 57–60.
33. Торхов М.І., Лозня С.В., Налесний М.Б. Метод виявлення вібраційного горіння палива у камерах згоряння газотурбінних установок. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. 2006. № 10(36). С. 103–106.
34. Singh A., Eshaghi A., Yu M., Gupta A.K., Bryden N.M. Simultaneous time-resolved fluctuating temperature and acoustic pressure field measurements in a premixed swirl flame. *Energy*. 2014. № 115. С. 116–127.
35. Nair S., Lieuwen T. Acoustic detection of blowout in premixed flames. *J. Propuls. Power*. 2005. № 21. С. 32–39.
36. Nair S., Lieuwen T. Acoustic Emissions of Premixed Flames on Swirl and Bluff-Body Stabilized Combustors near Flameout. In Proceedings of the 39<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Huntsville, USA. 20-23 July 2003.

#### REFERENCES

1. Kravchenko I.F. Formuvannya parametrichnoho obliku ta konstruktyvnoi shemy TRDD dlya UTL-LBL [Formation of the parametric appearance and design scheme of the turbofan engine for the TA-LCA] // *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika ta tekhnolohiya*. 2011. № 9(86). pp. 7 – 12.27.
2. Yepifanov S.V., Kuznetsov B.I., Bohaienko V.I. Suntez sistem upravlinnya ta diahnostuvannya gazoturbinnuh dvyguniv [Synthesis of control and diagnostic systems for gas turbine engines] / Kyiv: Tehnika, 1998. 312 p.
3. Kislov O.V., Schevchenko M.A. Osoblyvosti rozrakhunku ta rehuluvannya dvokonturnoho turboreaktivnoho dvuhuna z forsazhnoy kameroiu zhoryannya v zovnishnomu konturi v pryamotochnomu rezhumi robotu [Calculation and regulation features of dust-burning turbofan engine at ramjet modes] // *Aviatsiyno-kosmichna tekhnika ta tekhnolohiya*. 2020. № 6(166). pp. 15 – 23.
4. Chen Y., Fan Y., Bai X.S., Xu L., Shan X., Bi Y. Experimental study on combustion and flow resistance characteristics of an afterburner with air-cooled bluff-body flameholder // *Aerospace Science and Technology*. 2022. № 123. 107488.
5. Inozemtsev A.A., Sandratskiy V.L. Gazoturbinni dvyguny [Gas turbine engines]: VAT «Aviadvygun». 2011. 1024 p.
6. Herasymenko V.P. Teoriya aviatsiinykh dvyhuniv [Theory of aircraft engines] / Pidruchnyk. Kharkiv: Natsionalnyi aerokosmichnyi universytet, 2003. 199p.
7. Docquier N., Candel S. Combustion control and sensors: A review // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2002. № 28, pp. 107-150.
8. Ballester J., Garcia-Armingol T. Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2010. № 36. pp. 375-411.
9. Bader A., Bellovich J. Pilot, ignition and monitoring systems / *The John Zink Hamworthy Combustion Handbook*. 2013. 2nd ed. Boca Raton, USA. pp. 299-306.
10. Xu H., Fan W., Feng J., Yan P., Qi S., Zhang R. Parameter Determination and Ion Current Improvement of the Ion Current Sensor Used for Flame Monitoring // *Sensors*. 2021. 21. 697.
11. Chang L., Cao Z., Fu B., Lin Y., Xu L. Lean blowout detection for bluff-body stabilized flame // *Fuel*. 2020. № 266. 117008.
12. Li F., Xu L., Du M., Yang L., Cao Z. Ion current sensing-based lean blowout detection for a pulse combustor // *Combust. Flame*. 2017. № 176. pp. 263-271.
13. Ding Y., Durox D., Darabiha N., Schuller T. Combustion state monitoring of premixed heating appliances with flame ionization current and chemiluminescence // *Combust. Sci. Technol.* 2018. № 191. pp. 382-401.
14. Yan Y., Wang L., Qian X., Zhang W., Reda K., Wu J., Zheng G. Electrostatic sensors – Their principles and applications // *Measurement*. 2021. 169. 108506.
15. Gardiner D.P., Pucher G., Allan W.D., La Violette M. Flame-Out Detection for Gas Turbine Engines Based upon Thermocouple Signal Analysis // In Proceedings of the ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air. Barcelona, Spain. 6-11 May 2006. pp. 777-783.
16. Rolando A., D'Alessio A., D'Anna A., Allouis C., Beretta F., Minutolo P. Measurement of particulate volume fraction in a coflow diffusion flame using transient thermocouple technique // *Combust. Sci. Technol.* 2004. № 176. pp. 945-958.

17. Strandh P., Christensen M., Bengtsson J., Johansson R., Vressner A., Tunestal P., Johansson B. Ion Current Sensing for HCCI Combustion Feedback // In Proceedings of the Powertrain and Fluid Systems Conference and Exhibition. Pittsburgh, USA. 27-30 October 2003. SAE International: Pittsburgh, USA. 2003.
18. Yoshiyama S., Tomita E. Combustion Diagnostics of a Spark Ignition Engine Using a Spark Plug as an Ion Probe // In Proceedings of the Powertrain and Fluid Systems Conference and Exhibition. San Diego, USA. 21-24 October 2002. SAE International: San Diego, USA. 2002.
19. Chorpening B.T., Thornton J.D., Huckaby E.D., Benson K.J. Combustion oscillation monitoring using flame ionization in a turbulent premixed combustor // J. Eng. Gas. Turbines Power. 2006. № 129. pp. 352-357.
20. Tang Q., Liu H., Li M., Yao M., Li Z. Study on ignition and flame development in gasoline partially premixed combustion using multiple optical diagnostics // Combust. Flame. 2017. № 177. pp. 98-108.
21. Liu C., Cao Z., Lin Y., Xu L. Flame monitoring of a model swirl injector using 1D tunable diode laser absorption spectroscopy tomography // Meas. Sci. Technol. 2017. № 28. 054002.
22. Hariharan V., Mishra D. P. Dynamic flame stability diagnosis of inverse jet flame using CH\* chemiluminescence // Fuel. 2021. № 285. 119277.
23. Tsai C.F., Young M.S. Measurement system using ultraviolet and multiband infrared technology for identifying fire behavior // Rev. Sci. Instrum. 2006. № 77. 014901.
24. Xu L., Liu C., Jing W., Cao Z., Xue X., Lin Y. Tunable diode laser absorption spectroscopy-based tomography system for on-line monitoring of two-dimensional distributions of temperature and H<sub>2</sub>O mole fraction // Rev. Sci. Instrum. 2016. № 87. 013101.
25. Muruganandam T., Nair S., Neumeier Y., Lieuwen T., Seitzman J. Optical and Acoustic Sensing of Lean Blowout Precursors // In Proceedings of the 38<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Indianapolis, USA. 7-11 July 2002.
26. Zhuravlyov V.M., Torba Yu.I., Pavlenko D.V. Doslidzhennya parametriv protsesu vkluchennya forsazhnoi kamery zhoryannya GTD [Investigation of the parameters of the process of turning on the afterburner of GTE] // Aviatsiyno-kosmychna tekhnika ta tekhnolohyia, 2022. № 3(179). pp. 30-36.
27. Schulz C., Dreizler A., Ebert V., Wolfrum J. Combustion diagnostics // Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Berlin: 2007. pp. 1241-1315.
28. Khosravy el Hossaini M. Review of the New Combustion Technologies in Modern Gas Turbines // Progress in Gas Turbine Performance. – Intech Open. 2013. p. 16.
29. Z. Wang, N. Zhao, W. Wang, R Tang, S. Li. A fault diagnosis approach for gas turbine exhaust gas temperature base on fuzzy c-means clustering and support vector machine // Mathematical Problems in Engineering. 2015. Vol. 2015.
30. Afgan N.H., Carvalho M.G., Pilavachi P.A., Tourlidakis A., Olkhonski G.G., Martins N. An expert system concept for diagnosis and monitoring of gas turbine combustion chambers // Applied Thermal Engineering. 2006. Vol. 26. pp. 766-771.
31. Mauricio A., Helm D., Timusk M., Antoni J., Gryllias K. Novel cyclo-nonstationary indicators for monitoring of rotation machinery operating under speed and load varying conditions // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2022. Vol.144. pp. 24-40.
32. Loznya S.V., Nekrasov S.S., Solyanik V.G., Torhov M.I., Frenev O.V., Yakunin V.M. Zastosuvannya zasobiv vibratsiynoi diahnostryky dlya zakhystu vid vibratsiynoho horinnya [Application of means of vibration diagnostics for protection against vibration burning] // Vibratsii u tehnitsi ta tekhnolohiyakh. 2001. №4 (20). pp. 57-60.
33. Torhov M.I., Loznya S.V., Nalesnyj M.B. Metod vyyavlennya vibratsiynoho horinnya palyva u kamerah zhoryannya hazotyrbinyh ustanovok [Method for detecting vibrational combustion of fuel in combustion chambers of gas turbine installations] // Aviatsiyno-kosmychna tekhnika ta tekhnolohyia, 2006. № 10(36). pp. 103-106.
34. Singh A., Eshaghi A., Yu M., Gupta A.K., Bryden N.M. Simultaneous time-resolved fluctuating temperature and acoustic pressure field measurements in a premixed swirl flame // Energy. 2014. №115. pp. 116-127.
35. Nair S., Lieuwen T. Acoustic detection of blowout in premixed flames // J. Propuls. Power. 2005. №21. pp. 32-39.
36. Nair S., Lieuwen T. Acoustic Emissions of Premixed Flames on Swirl and Bluff-Body Stabilized Combustors near Flameout // In Proceedings of the 39<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Huntsville, USA. 20-23 July 2003.

УДК 004.92 : 539.3 : 624.04  
DOI <https://doi.org/10.26661/2786-6254-2024-2-05>

## БІФУРКАЦІЙНІ СТАНИ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ЗАКРИТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТРИШАРОВИХ СКЛАДЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ

**Грищак В. З.**

*доктор технічних наук, професор  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»  
просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна  
[orcid.org/0000-0001-8685-3191](https://orcid.org/0000-0001-8685-3191)  
[HRYSHCHAK.V.Z@mnu.one](mailto:HRYSHCHAK.V.Z@mnu.one)*

**Грищак Д. В.**

*кандидат технічних наук  
Міністерство з питань стратегічних галузей промисловості України  
вул. Івана Франка, 21-23, Київ, Україна  
[orcid.org/0000-0001-6474-6926](https://orcid.org/0000-0001-6474-6926)  
[GDVspace@gmail.com](mailto:GDVspace@gmail.com)*

**Д'яченко Н. М.**

*кандидат фізико-математичних наук, доцент,  
доцент кафедри фундаментальної та прикладної математики  
Запорізький національний університет  
вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна  
[orcid.org/0000-0001-5284-4502](https://orcid.org/0000-0001-5284-4502)  
[dyachenkonata69@gmail.com](mailto:dyachenkonata69@gmail.com)*

**Купріков В. О.**

*аспірант кафедри програмної інженерії  
Запорізький національний університет  
вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна  
[orcid.org/0009-0008-3221-582X](https://orcid.org/0009-0008-3221-582X)  
[Paladman2009@gmail.com](mailto:Paladman2009@gmail.com)*

**Ключові слова:** *стійкість тришарової оболонки, складені конструкції типу «циліндр-конус» та «циліндр-конус-циліндр», комбіноване навантаження, стиковальні та проміжні шпангоути, алгоритмізація та комп'ютерна візуалізація закритичного хвилеутворення.*

Досліджуються біфуркаційні стани підкріпленої складених оболонкових тришарової конструкції типу «циліндр-конус» та «циліндр-конус-циліндр» з візуалізацією закритичних форм відповідно до характеру зовнішнього навантаження. Розглядається втрата стійкості при комбінації зусиль: зовнішнього тиску, осьової сили та крутного моменту.

Система рівнянь для визначення характеристик стійкості утворюється із диференціальних розв'язувальних рівнянь шостого порядку для конічної та циліндричних секцій конструкції та співвідношень, що визначають спряження з переходом через шпангоути. До розв'язання системи застосовується метод скінченних різниць.

На основі розрахунків зазначеним методом розроблено загальний алгоритм побудови сітки каркасу випинання конструкції, на базі якого – поетапну схему та програмний код Maple для візуалізації форм втрати стійкості досліджуваних конструкцій. Побудовано форми хвилеутворення за різних вхідних геометричних характеристик конструкції та жорсткостей шпангоутів.

Проведено порівняльний аналіз з відомими результатами через граничний перехід від отриманих в роботі результатів для тришарової до одношарової оболонкової конструкції «циліндр-конус».

Побудовано граничні поверхні, що відокремлюють область стійкості конструкції обох типів.

Проведено аналіз впливу на критичний тиск характеристик внутрішнього шару матеріалу конструкцій.

Аналіз поведінки хвилі при випинанні дозволяє відслідковувати перепади в амплітудах та знайти ефективну комбінацію жорсткостей шпангоутів та місця розміщення проміжного шпангоута, за яких поведінка хвилі має найбезпечніший характер для конструкції.

Вибір раціональних значень жорсткостей шпангоутів як з точки зору впливу на критичний тиск, так і на безпечний характер форми втрати стійкості, дозволяє також знизити масу конструкції.

## BIFURCATION STATES AND VISUALIZATION OF POST-CRITICAL DEFORMATION OF THREE-LAYER COMPOSITE STRUCTURES

**Gristchak V. Z.**

*Doctor of Technical Sciences, Professor  
Dnipro University of Technology  
Dmytra Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine  
orcid.org/0000-0001-8685-319  
HRYSHCHAK.V.Z@mnu.one*

**Hryshchak D. V.**

*Candidate of Technical Sciences  
The Ministry of Strategic Industries  
Ivan Franko str., 21-23, Kyiv, Ukraine  
orcid.org/0000-0001-6474-6926  
GDVspace@gmail.com*

**Dyachenko N. M.**

*Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Fundamental and Applied Mathematics  
Zaporizhzhia National University  
Universytetska str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine  
orcid.org/0000-0001-5284-4502  
dyachenkonata69@gmail.com*

**Kuprikov V. O.**

*Postgraduate at the Department of Software Engineering  
Zaporizhzhia National University  
Universytetska str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine  
orcid.org/0009-0008-3221-582X  
Paladman2009@gmail.com*

**Key words:** *stability of three-layer shells, compound structures of the ‘cylinder-cone’ and ‘cylinder-cone-cylinder’ types, combined loading, connecting and intermediate rings, algorithmization, and computer visualization of post-critical wave formation.*

The bifurcation states of reinforced compound shell three-layer structures of the ‘cylinder-cone’ and ‘cylinder-cone-cylinder’ type are studied with the visualization of post-critical forms according to the nature of the external load. The loss of stability with a combination of forces: external pressure, axial force and torque is considered.

The system of equations for determining the stability characteristics is formed from the sixth-order differential solving equations for the conical and



cylindrical sections of the structure and the ratios that determine the conjugation with the transition through the rings. The finite difference method is used to solve the system.

Based on calculations using the specified method, a general algorithm for constructing the mesh of the structure's buckling frame was developed. Using this algorithm, a step-by-step scheme and Maple software code were created to visualize the buckling forms of the studied structures. Wave formation patterns were constructed for various input geometrical characteristics of the structure and different ring stiffness values.

A comparative analysis was conducted with known results through the limit transition from the results obtained in the work for a three-layer to a single-layer 'cylinder-cone' shell structure.

Boundary surfaces that separate the area of stability of structures of both types are constructed.

An analysis of the influence on the critical pressure of the characteristics of the inner layer of the material of both types of structures was carried out.

The analysis of wave behavior during buckling allows you to monitor amplitude differences and find an effective combination of rings stiffnesses and the location of the intermediate frame, under which the wave behavior has the safest character for the structure.

The choice of rational stiffness values of the rings, both from the point of view of the impact on the critical pressure and on the safe nature of the shape of the buckling, also allows reducing the weight of the structure.

**Вступ.** Тонкостінні оболонки є силовими елементами конструкцій в багатьох галузях: в будівництві, хімічній промисловості, спорудженні літальних апаратів різного призначення, авіаційної і ракетно-космічної техніки, та в інших галузях. При проектуванні оболонкових конструкцій значна увага приділяється їхній стійкості та міцності під дією зовнішнього навантаження (зовнішнього тиску, осьових зусиль, крутіння). Для покращення експлуатаційних характеристик при мінімальній матеріаломісткості використовують композитні або тришарові матеріали [1–5].

Комп'ютерна візуалізація хвилеутворення при втраті стійкості оболонкової конструкції дозволяє наочно дослідити форму хвилі, місця її зосередження з метою дослідження проблеми раціонального проектування конструкції, зокрема, обирати геометричні параметри конструкції, жорсткісні характеристики підкріплюючих елементів, що, у тому числі, впливає на загальну масу конструкції [3].

У роботі візуалізація форм випинання конструкції реалізується під час вивчення задачі стійкості складеної оболонкової конструкції, утвореної з циліндричних та конічної секцій. Конструкція знаходиться під впливом комбінованого зовнішнього навантаження рівномірним зовнішнім тиском, осьовим зусиллям та крутним моментом, в результаті чого вона може втратити стійкість.

**Метою дослідження** є алгоритмізація комп'ютерної візуалізації хвилеутворення та аналіз біфуркаційних станів за загальної втрати стійкості складених конструкцій типу «циліндр-конус» та «циліндр-конус-циліндр» при комбінованому навантаженні, аналізу хвилеутворення, зокрема, під впливом підкріплюючих шпангоутів, з метою раціонального проектування і зниження вагових характеристик досліджуваної конструкції.

**Огляд літератури.** Дослідженням стійкості однорідних і багатошарових оболонкових кон-

струкцій присвячені, зокрема, роботи [1–3; 6–19]. Огляд публікацій в цій галузі міститься у працях [10; 13; 16]. Останнім часом значна увага приділяється теоретичним та експериментальним дослідженням складених конструкцій, утворених з конічної та циліндричної секцій [6; 8–10; 12–14; 16–18]. Дослідження втрати стійкості супроводжується побудовою граничних поверхонь, що відокремлюють область стійкості конструкцій [2; 6; 8; 12; 16].

Вивченню впливу на стійкість оболонкової конструкції тришарового матеріалу, що складається з двох зовнішніх жорстких шарів і внутрішнього шара-наповнювача незначної жорсткості і щільності, присвячено роботи [1–3]. Для збільшення стійкості оболонкової конструкції її підкріплюють торцевими і проміжними шпангоутами [3; 6; 8–10; 13–18].

Дана робота продовжує дослідження, розпочаті в працях [2; 3], в першій з яких досліджено стійкість тришарової невідкріпленої конічної оболонки, а в другій – складеної підкріпленої оболонкової конструкції типу «конус-циліндр», відсіки якої стикаються з великої основи конуса.

Наразі значного розвитку набувають різноманітні аспекти комп'ютерної візуалізації характеру хвилеутворення оболонок у закритичному стані [3; 7–9; 14; 16]. Проблеми комп'ютерної візуалізації форм втрати стійкості є важливим питанням проектування оболонкових конструкцій, який дозволяє проводити комп'ютерний експеримент замість дороговартісного реального.

Для розрахунків напружено-деформівного стану оболонкових конструкцій, розрахунків на міцність, несучу здатність та стійкість використовуються вітчизняні та зарубіжні системи автоматизації інженерних розрахунків і аналізу, серед яких найбільш поширеними є програмні комплекси ANSYS, Abacus, MSC.Patran і MSC.Nastran та інші. Таке програмне забезпечення найбільш ефективно

при скінченно-елементному чисельному аналізі, а також скінченно-різницевою для рівнянь у частинних похідних з візуалізацією результатів [8; 9; 14; 16]. В даній роботі застосовується метод скінченних різниць по відношенню до розв'язувальних звичайних диференціальних рівнянь та диференціальних співвідношень переходу через шпангоути, за результатами якого проводиться візуалізація. Системи комп'ютерної математики дозволяють швидко, ефективно та якісно проводити як інженерні розрахунки (у поставленій задачі – реалізувати метод скінченних різниць), так і здійснювати комп'ютерну візуалізацію.

Підхід до використання візуалізації в аналізі біфуркаційних станів розпочато в роботах [7; 8] для деяких типів тонкостінних одношарових оболонкових конструкцій, в роботах [3; 7] – для тришарових. Проте алгоритму комп'ютерної візуалізації не приділено увагу. Тут запропонуємо алгоритм для конструкцій таких типів, які раніше не розглядалися.

**Постановка задачі та розв'язувальні рівняння.** На основі відомих повних систем основних диференціальних рівнянь в частинних похідних, що моделюють стійкість тришарових циліндричної та конічної оболонок, котрі застосовують гіпотези Кирхгофа-Лява для несучих шарів, нестисливість матеріалу заповнювача, а також приведені коефіцієнт Пуассона і модуль пружності, в роботах [2; 3] виведено розв'язувальні рівняння відносно функцій прогинів відповідних оболонок.

Для тришарових стінок оболонок (рис. 1, а)

дотримуємося позначень робіт [2; 3]:  $h_j$ ,  $\nu_j$  та  $E_j$  – товщини, коефіцієнти Пуассона та модулі пружності зовнішнього шару ( $j=1$ ), внутрішнього ( $j=2$ ) та заповнювача ( $j=3$ ),  $h_0$  – товщина стінки оболонки. За умови, що стінки тришарової оболонки утворено з ізотропних несучих шарів і трансверсально ізотропного заповнювача, вводяться наступні параметри [2]:

$$\nu = \sum_{j=1}^3 \frac{E_j h_j \nu_j}{1 - \nu_j^2} \left( \sum_{j=1}^3 \frac{E_j h_j}{1 - \nu_j^2} \right)^{-1}, \quad E = \frac{1 - \nu^2}{h_0} \left( \sum_{j=1}^3 \frac{E_j h_j}{1 - \nu_j^2} \right) -$$

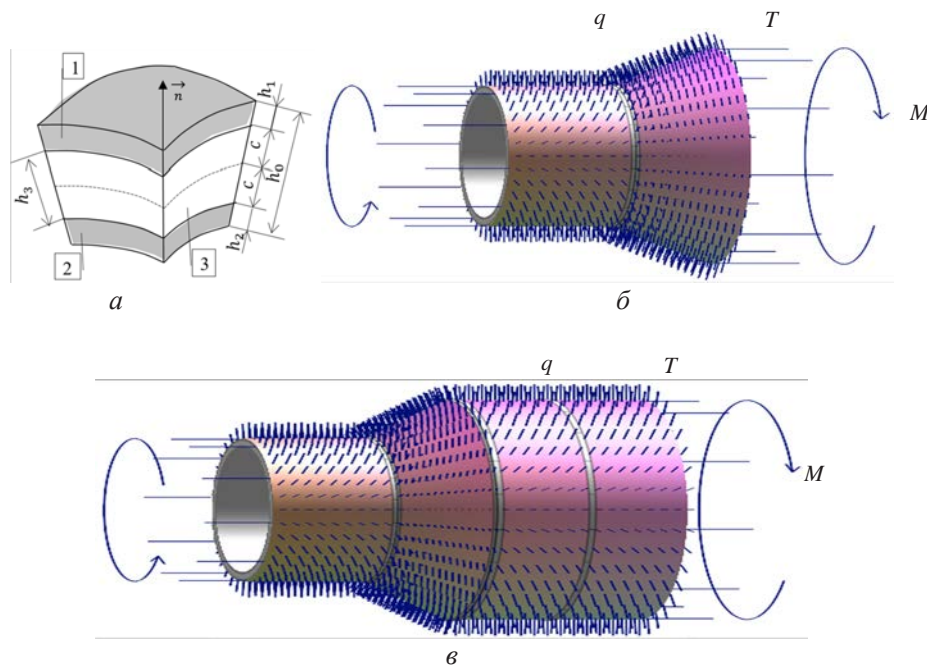
приведені коефіцієнт Пуассона та модуль пружності,

$$K_{cone} = \frac{h_0^2}{\beta l_1^2}, \quad K_{cyl,i} = \frac{h_0^2}{\beta L_i^2} \quad (i = \overline{1, 2}) -$$

параметри зсуву конічного та циліндричного відсіку конструкції відповідно.

Для обчислення параметрів  $\Theta$ ,  $\vartheta$ ,  $\beta$  використовуються формули, наведені в роботі [2].

У даній роботі розглянемо лінійну осесиметрична задача стійкості тонких пружних тришарових оболонкових конструкцій типу «циліндр-конус» (рис. 1, б), що стикаються з малою основою конуса, та «циліндр-конус-циліндр» (рис. 1, в), що стикаються з обома основами конуса. Будемо досліджувати випадок, коли конструкції знаходяться під одночасним впливом зовнішнього тиску, осьової сили і крутіння, здатним викликати втрату стійкості. Продовжуючи дослідження, розпочаті в роботах [2; 3; 8], будемо знаходитися



**Рис. 1. Схеми складених тришарових оболонкових конструкцій при комбінованому навантаженні**

в рамках теорії тонких оболонок, в якій припускається, що зміна напружено-деформованого стану у кільцевому напрямку суттєво перевищує зміну напружено-деформованого стану в осьовому напрямку, а хвильове число задовольняє нерівність.

Дотримуючись позначень робіт [2; 3; 8], для складеної конструкції покладемо:  $\bar{s}_i$  та  $s$  – координати вздовж твірної циліндричних та конічного відсіків відповідно;  $y_i$  – координата вздовж дуги циліндрів;  $\varphi$  – дугова координата вздовж паралелі конуса;  $\alpha$  – кут при основі конуса;  $l_0$  і  $l_1$  – відстані вздовж твірної до меншої та більшої основ зрізаного конуса;  $L_i$  і  $R_i$  – довжини твірних та радіуси циліндрів ( $i = \overline{1, 2}$ ). Розглядатимемо конструкції, відсіки яких стикаються так, як показано на рис. 1, б, в. Вводяться величини

$$x = \frac{s}{l_1}, \quad \bar{x}_i = \frac{\bar{s}_i}{L_i}, \quad \bar{\varphi}_i = \frac{y_i}{R_i}, \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{h_0 \operatorname{ctg} \alpha}{l_1 \sqrt{12(1-\nu^2)}}},$$

$$k_i = \frac{L_i}{R_i}, \quad \varepsilon_{1,i} = \frac{h_0}{R_i}, \quad \gamma_{cone} = \frac{n}{\cos \alpha} \gamma_1, \quad \gamma_{cyl,i} = \frac{nL_i}{R_i} \gamma_1,$$

де  $\gamma_1$  – кут нахилу гребня хвилі до твірної,  $i = \overline{1, 2}$ .

Для конічної оболонки, нехтуючи доданками, що містили  $\varepsilon$  в степені не менше другого, в роботі [2] виведено розв'язувальне диференціальне рівняння шостого порядку зі змінними коефіцієнтами відносно функції прогину  $\Psi_{cone}(x)$ , а для циліндричних оболонок, нехтуючи доданки, що містять множник  $\frac{\varepsilon_{1,i}}{k_i^2 n^2}$ , в роботі [3] отримано розв'язувальне диференціальне рівняння основного напруженого стану відносно функції прогину  $\Psi_{cyl,i}(\bar{x}_i)$ . Відповідні рівняння мають вигляд:

$$a_0(x)\Psi_{cone}(x) + a_1(x)\Psi'_{cone}(x) + a_2(x)\Psi''_{cone}(x) +$$

$$+ a_3(x)\Psi'''_{cone}(x) + a_4(x)\Psi^{IV}_{cone}(x) + a_5(x)\Psi^V_{cone}(x) + a_6(x)\Psi^{VI}_{cone}(x) = 0; \quad (1)$$

$$b_{0,i}\Psi_{cyl,i}(\bar{x}_i) + b_{2,i}\Psi''_{cyl,i}(\bar{x}_i) + b_{4,i}\Psi^{IV}_{cyl,i}(\bar{x}_i) + b_{6,i}\Psi^{VI}_{cyl,i}(\bar{x}_i) = 0, \quad (2)$$

де коефіцієнти  $a_j(x)$  ( $j = \overline{0, 6}$ ) і  $b_{j,i}$  ( $j = \overline{0, 2, 4, 6}$ ,  $i = \overline{1, 2}$ ) виражаються через параметри, що характеризують геометрію конуса  $\alpha$ ,  $l_1$ ,  $l_0$ ,  $h_0$  та циліндричних оболонок  $L_i$ ,  $R_i$ ,  $h_0$ ,  $k_i$  відповідно, тришаровий матеріал стінки оболонок  $E$ ,  $\nu$ ,  $\vartheta$ ,  $\Theta$ ,  $K_{cone}$ ,  $K_{cyl,i}$ , зовнішні навантаження  $q$ ,  $T$ ,  $M$ , хвильове число  $n$ , кут нахилу гребня хвилі до твірної конуса  $\gamma_{cone}$  і циліндрів  $\gamma_{cyl,i}$  відповідно, малі параметри  $\varepsilon$  та  $\varepsilon_{1,i}$ , ( $i = \overline{1, 2}$ ). Формули для обчислення коефіцієнтів рівнянь (1) і (2) наведені в [3].

Крайові умови передбачають, що торці тришарової складеної оболонкової конструкції вільно оперті, а також є діафрагма нескінченної жорсткості, що перешкоджає відносному зсуву несучих шарів уздовж краю оболонки [2; 3]. Зважаючи на взаємні розміщення відсіків оболонок, зазначені крайові умови записується у вигляді:

$$\Psi_{cyl,1} = \frac{\partial^2 \Psi_{cyl,1}}{\partial \bar{x}_1^2} = \frac{\partial^4 \Psi_{cyl,1}}{\partial \bar{x}_1^4} = 0 \quad \text{при} \quad \bar{x}_1 = 0; \quad (3)$$

$$\Psi_{cone} = \frac{\partial^2 \Psi_{cone}}{\partial x^2} = \frac{\partial^4 \Psi_{cone}}{\partial x^4} = 0 \quad \text{при} \quad x = 1 \quad (4)$$

для конструкцій обох типів («циліндр-конус» та «циліндр-конус-циліндр»);

$$\Psi_{cyl,2} = \frac{\partial^2 \Psi_{cyl,2}}{\partial \bar{x}_2^2} = \frac{\partial^4 \Psi_{cyl,2}}{\partial \bar{x}_2^4} = 0 \quad \text{при} \quad \bar{x}_2 = 1 \quad (5)$$

для конструкції «циліндр-конус-циліндр».

Продовжуючи дослідження роботи [3], до розв'язання поставленої задачі застосовуємо метод скінченних різниць (МСР) [19]. Для звичайних диференціальних рівнянь шостого порядку, що відповідають конічній (1) та циліндричній (2) секціям, у МСР застосовуються центральні скінченні різниці третього порядку у внутрішніх точках  $\bar{x}_{k,i}$  або  $x_k$  ( $k = \overline{1, N-1}$ ,  $i = \overline{1, 2}$ ) розбиття відрізків  $[0; 1]$  або  $[l_0/l_1; 1]$ , що відповідають цим секціям. Крайові умови (3) – (5) подаються скінченими різницями другого порядку. Такі різниці відношення виписані у роботі [3].

В роботі [8] містяться деталі щодо урахування впливу дискретного характеру розміщення проміжних шпангоутів, у тому числі, стикувального, причому параметри жорсткості шпангоутів приймаються у вигляді:

$$G_{cone,2}^* = G_2 \frac{1}{\cos \alpha}, \quad G_{cone,2}^* = G_2 \frac{1}{\cos \alpha}; \quad G_{cyl,1}^* = G_1, \quad G_{cyl,2}^* = G_2; \quad (6)$$

$$G_1 = \frac{n^4 (n^2 - 1)^2 (EJ)_x^{ring}}{Eh R_{ring}^3}, \quad G_2 = \frac{n^2 (n^2 - 1)^2 (EJ)_z^{ring}}{Eh R_{ring}^3 (n^2 + 1)},$$

де  $J_x^{ring}$ ,  $J_z^{ring}$  – моменти інерції при згинанні шпангоута в площині початкової кривизни та із площини (на кручення) відповідно.

У випадку розміщення шпангоута на стику секцій так само, як в роботі [8], розглянемо два стикувальних шпангоути на краях конічного та циліндричного відсіків з половиною жорсткістю, так що умови спряження через шпангоут матимуть вигляд:

– для конструкцій обох типів:

$$\Psi_{cyl,1}^{(j)}(1) = \Psi_{cone}^{(j)}(l_0/l_1) \quad \text{для всіх} \quad j = 0; 4; 5; \quad (7)$$

$$\Psi_{cyl,1}''(1) + \frac{1}{2} G_{cyl,2} \Psi_{cyl,2}'(1) = \Psi_{cone}'(l_0/l_1) + \frac{1}{2} G_{cone,2} \Psi_{cone}'(l_0/l_1); \quad (8)$$

$$\Psi_{cyl,1}'''(1) + \frac{1}{2} G_{cyl,1} \Psi_{cyl,1}(1) = \Psi_{cone}'''(l_0/l_1) - \frac{1}{2} G_{cone,1} \Psi_{cone}(l_0/l_1), \quad (9)$$

– для конструкції типу «циліндр-конус-циліндр» додатково

$$\Psi_{cone}^{(j)}(1) = \Psi_{cyl,2}^{(j)}(0) \quad \text{для всіх} \quad j = 0; 4; 5; \quad (10)$$

$$\Psi_{cone}''(1) + \frac{1}{2} G_{cone,2} \Psi_{cone}'(1) = \Psi_{cyl,2}''(0) - \frac{1}{2} G_{cyl,2} \Psi_{cyl,2}'(0); \quad (11)$$

$$\Psi_{cone}'''(1) - \frac{1}{2} G_{cone,1} \Psi_{cone}(1) = \Psi_{cyl,2}'''(0) + \frac{1}{2} G_{cyl,1} \Psi_{cyl,2}(0). \quad (12)$$

За формулами, аналогічними до наведених в [3], зазначені умови записуються через скінченні різниці другого порядку з одним кроком назад для похідних в лівих частинах рівностей (7) – (12) та вперед – в правих.

У випадку розміщення проміжного шпангоута на циліндричній оболонці використовуються умови [3]:

$$\Psi_{cyl,i}^{(j)}(\bar{x}_{cyl,left}) = \Psi_{cyl,i}^{(j)}(\bar{x}_{cyl,right}) \text{ для всіх } j = 0; 4; 5;$$

$$\Psi_{cyl,i}''(\bar{x}_{cyl,left}) + G_{cyl,2} \Psi_{cyl,i}'(\bar{x}_{cyl,left}) = \Psi_{cyl,i}''(\bar{x}_{cyl,right}), \quad (13)$$

$$\Psi_{cyl,i}''(\bar{x}_{cyl,left}) - G_{cyl,1} \Psi_{cyl,i}'(\bar{x}_{cyl,left}) = \Psi_{cyl,i}''(\bar{x}_{cyl,right}), \quad i = 1 \text{ або } 2, \quad (14)$$

зі скінченними різницями, аналогічними до зазначеного вище типу.

**Комп'ютерна візуалізація.** В методі скінченних різниць відрізки, на яких визначено функції прогину кожної оболонкової секції, діляться на  $N$  рівних частин. Місце розміщенні проміжного шпангоута на циліндричній секції більшого радіусу визначається коефіцієнтом поділу  $k_{cyl}$ .

Загальний алгоритм для побудови сітки каркасу оболонкової конструкції у закритичному стані відображає блок-схема на рис. 2. Узгодженні з нею розрахунки та комп'ютерну візуалізацію форм втрати стійкості проведено засобами системи комп'ютерної математики Maple17 поетапно.

#### Етап 1.

– Метод скінченних різниць, застосований до системи однорідних рівнянь (1)–(5), (7)–(14), зводить її до однорідної системи однорідних лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) відносно скінченної кількості значень функції прогину у вузлах розбиття.

– Прирівнюємо визначник СЛАР до нуля, приходимо до характеристичного рівняння відносно параметрів хвилеутворення втрати стійкості  $n, q, T, M, \gamma_1$ . Для заданих значень осьового зусилля  $T$  та крутного моменту  $M$  потрібно знайти такі значення хвильового числа  $n$  в кільцевому напрямку та параметр нахилу хвилі до твірної оболонки  $\gamma_1$ , щоб значення тиску  $q$  було найменшим.

**Етап 2.** Значення характеристик стійкості використаних ( $T$  та  $M$ ) та знайдених ( $n, \gamma_1$  та  $q$ ) на етапі 1 підставляємо в різницеву систему алгебраїчних рівнянь відносно значень функції прогину в точках розбиття. Для отримання ненульових значень дискретизованої функції прогину, праву частину одного з рівнянь системи перевиначаємо не нулем.

Розв'язок отриманої системи нормуємо та помножаємо на константу, придатну для візуалізації закритичного хвилеутворення. Застосовуємо для нього позначення  $\{y[i]\}$ .

**Етап 3.** Розглянемо візуалізацію закритичного хвилеутворення оболонкової конструкції.

– *Циліндрична секція меншого радіусу.* Визначаємо координати точок поверхні для зазначеної секції. Врахуємо, що нормальні переміщення точок серединної поверхні виражаються через функцію прогину формулою

$\Psi_{cyl,1}(\bar{x}, \bar{\phi}) = \Psi_{cyl,1}(\bar{x}) \cdot \cos(\gamma_{cyl,1}(1 - \bar{x}) + n\bar{\phi})$  [3]. Реалізуємо розбиття відрізка  $[0; 2\pi]$ , на якому визначена дуга координата циліндра, на 100 рівних частин. Застосовуємо перехід до циліндричних координат для визначення масиву точок поверхні, що записуємо за допомогою коду

$$\int_{-1}^1 \frac{\Psi_m^*(s)}{\sqrt{1-s^2}} ds = \sum_{k=1}^N \frac{\pi}{N} \Psi_m^*(s_k)$$

Задаємо параметри освітлення, орієнтації та стилів відповідної поверхні:

– *Конічна секція.* Для визначення координат точок конічної секції при випинанні використаємо формулу залежності нормальних переміщень точок серединної поверхні конічної оболонки від функції прогину  $\Psi_{cone}(x, \phi) = \Psi_{cone}(x) \cdot \tan \alpha \cdot \cos(\gamma_{cone}(1 - x) + n\phi)$  [2], геометрію конічної оболонки, взаємне розміщення оболонок, їхню орієнтацію та нумерацію змінних, у тому числі тих, що входять до відношень стикування через шпангоут. Візуалізуємо хвилеутворення конічної секції за допомогою коду:

```
G1 := surfdata(g1, axes = none, lightmodel = "light2", orientation = [90, -0, 100], shading = XYZ, style = surface) :
```

– *Циліндрична секція більшого радіусу.* Для конструкції «циліндр-конус-циліндр» з проміжним шпангоутом на циліндричній секції більшого радіусу застосовуємо ідеї, викладені для випадку циліндричної секції меншого радіусу, а також враховуємо узгодженість секцій та нумерацію змінних. Для секції, розташованої ліворуч від шпангоута, застосовуємо код:

```
a := 0; b := 1; h3 := (b - a) / (N - 1); xB := a + h3 * (ii - 1); B := L2 * xB :
```

```
sl := - (yl * n * L1) / (2 * R1) - (yl * l0 * n) / (2 * l1 * cos(alpha)) :
```

```
A := R2 + y[ii + 2 * N + 8] * cos(sl + (yl * (1 - xB) * n * L2) / R2 * kcy1 + n * phiB) :
```

```
g3 := [seq([seq([A * cos(phiB), A * sin(phiB), B * kcy1 + L1 + (l1 - l0) * sin(alpha)], ii = 1 .. N)], jj = 1 .. 101) ] :
```

```
G3 := surfdata(g3, axes = none, lightmodel = "light2", orientation = [90, -0, 100], shading = XYZ, style = surface) :
```

для секції праворуч від шпангоута –

```
sl := - (yl * n * L1) / (2 * R1) - (yl * l0 * n) / (2 * l1 * cos(alpha)) - yl * (1 - 2 / (N - 1)) * (n * L2) / R2 * kcy1
```

```
A := R2 + y[ii + 3 * N + 12] * cos(sl + (yl * (1 - xB) * n * L2) / R2 * (1 - kcy1) + n * phiB) :
```

```
g4 := [seq([seq([A * cos(phiB), A * sin(phiB), L1 * kcy1 + B * (1 - kcy1) + L1 + (l1 - l0) * sin(alpha)], ii = 1 .. N)], jj = 1 .. 101) ] :
```

```
GG4 := surfdata(g4, axes = none, lightmodel = "light2", orientation = [90, -0, 100], shading = XYZ, style = surface) ;
```

Якщо шпангоут на циліндричній секції більшого радіусу не розміщується, то в наведеному коді для «лівої» секції потрібно покласти  $kcy1 = 1$ .

– *Візуалізація шпангоутів* на конструкції реалізується на основі кодів, побудованих вище для

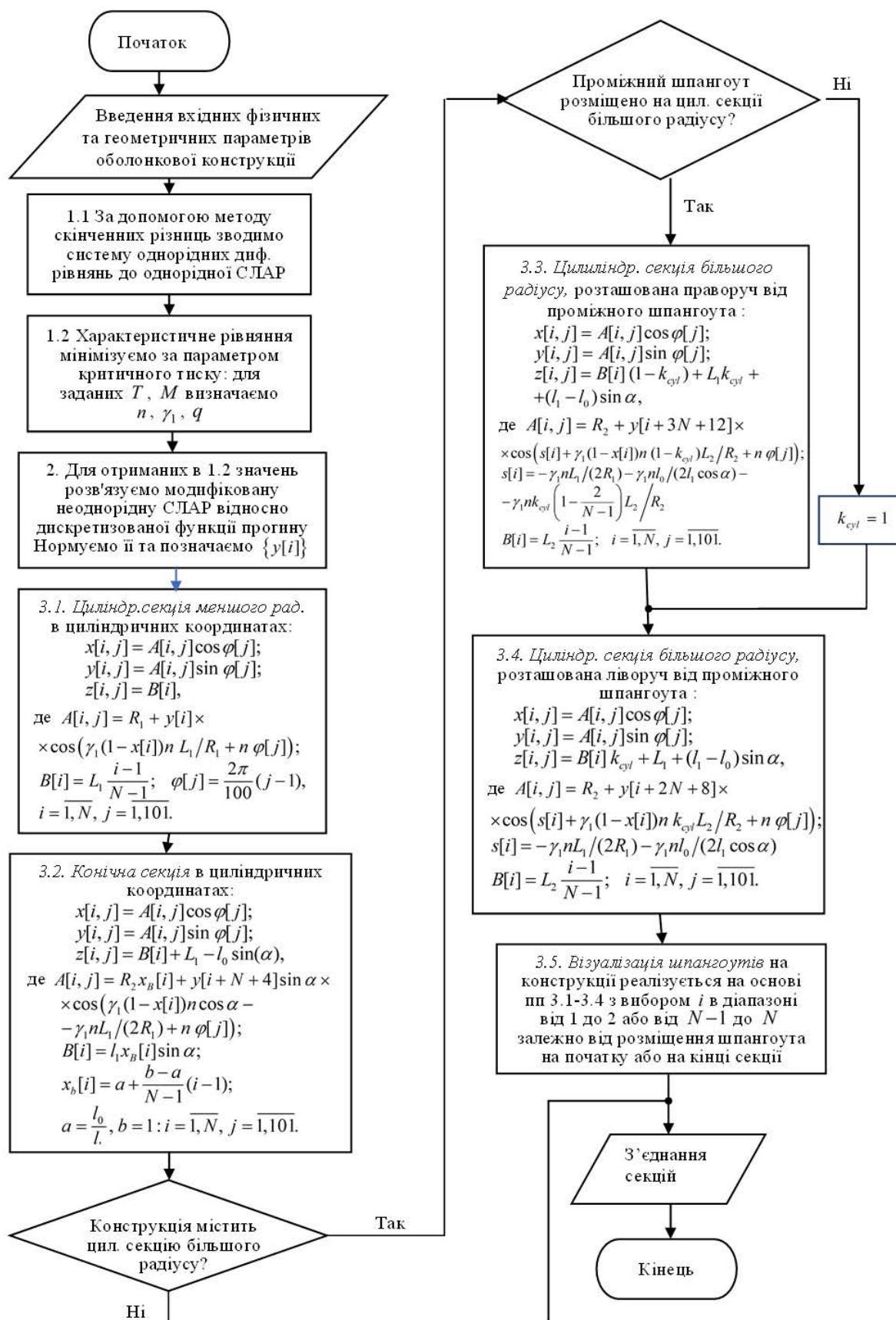


Рис. 2. Блок-схема алгоритму побудови сітки каркасу оболонкової конструкції у закритичному стані

основних оболонок, з вибором змінної  $ii$  в діапазоні від 1 до 2 або від  $N - 1$  до  $N$  залежно від розміщення шпангоута на початку або на кінці секції, а також з вибором видозмінених стилів візуалізації поверхні.

–Остаточна візуалізація *хвилеутворення при загальній втраті стійкості* конструкції реалізується з використанням команди ‘display’.

**4. Аналіз числових результатів та візуалізація закритичного хвилеутворення.** Аналогічно до [3] чисельний аналіз проводився для оболонок з параметрами:  $l_1 = 1.82$  м і  $h_0 = 5 \cdot 10^{-3}$  м, коефіцієнтами Пуассона усіх шарів  $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = \nu = 0.3$ , модулями пружності зовнішніх шарів  $E_1 = E_2 = 1.04 \cdot 10^{11}$  Па; вводяться безрозмірні параметри

$$T^* = \frac{T}{Eh_0^2}, M^* = \frac{M}{2\pi Eh_0^3}$$

та допоміжний параметр зовнішнього критичного тиску

$$q^* = q \cdot 10^{-5} [\text{Pa}].$$

Для розрахунків критичних зусиль загальної втрати стійкості спочатку обирається тришарова оболонкова конструкція «циліндр-конус» з параметрами  $E_3/E_1 = 0.01$ ,  $L_1 = 2.5R_1$ ,  $l_0 = 0.65 l_1$ ,  $\alpha = 75^\circ$ .

**Порівняльний аналіз з відомими результатами.** В роботі [3] проведено порівняння числових результатів, отриманих зазначеними методами для циліндричної та конічної оболонок, з результатами, отриманими за відомими формулами, і одержано значну узгодженість. Для порівняльного аналізу у випадку складених конструкцій скористаємося результатами роботи [8] для одношарової оболонкової конструкції, застосуємо наведені в ній рівняння та методи для розрахунку стійкості конструкції «циліндр-конус» та реалізуємо граничний перехід від тришарової до одношарової оболонкової конструкції. Виберемо достатньо мале значення  $h_3/h_0 = 0.01$ , яке дозволяє визначити граничний перехід (при  $h_3/h_0 \rightarrow 0$ ) від тришарової до одношарової оболонки. Табл. 1 містить значення критичного тиску для тришарової та одношарової конструкції. Аналітичне

Таблиця 1

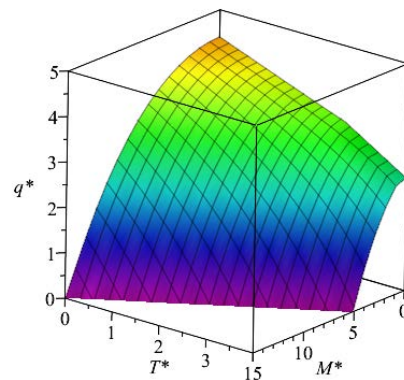
**Порівняння результатів розрахунків загальної втрати стійкості для тришарової та одношарової оболонкових конструкцій «циліндр-конус»**

«Циліндр-конус»	$G_1 = 0, G_2 = 0$ (без підкріплення)		$G_1 = 5000, G_2 = 10$ для стикувального шпангоута	
	$q^*$	$n$	$q^*$	$n$
За рівняннями (1)–(3), (7)–(9) при $h_3/h_0 = 0.01$	6.295394	4	11.865176	7
За рівняннями роботи [8]	6.311711	4	11.825235	7

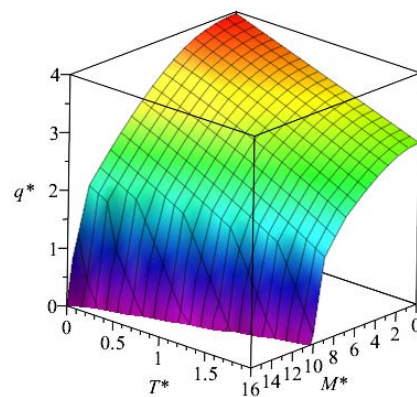
обґрунтування можливості граничного переходу для конічної оболонки містяться у роботі [2]. Результати, наведені у табл. 1, демонструють можливість реалізації зазначеного граничного переходу для складеної оболонкової конструкції типу «циліндр-конус».

Узгодженість результатів проведених розрахунків (табл. 1) з результатами роботи [8] свідчить також про достовірність запропонованих математичних моделей та алгоритмів.

**Граничні поверхні досліджуваних складених оболонкових конструкцій.** Тут і далі розглянемо тришарову оболонку з параметром товщини внутрішнього шару  $h_3/h_0 = 0.6$ . На рис. 3 представлені граничні поверхні, що відокремлюють області стійкості від області втрати стійкості для тришарової невідкріпленої оболонкової конструкції «циліндр-конус» із зазначеними вище параметрами, а на рис. 4 – для конструкції «циліндр-конус-циліндр», підкріпленої стикувальними шпангоутом з параметрами жорсткості  $G_1 = 5000$ ,  $G_2 = 10$ .

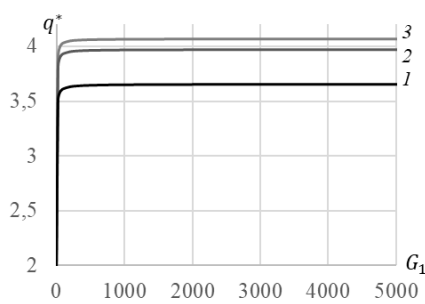


**Рис. 3. Гранична поверхня стійкості тришарової невідкріпленої оболонкової конструкції «циліндр-конус»**



**Рис. 4. Гранична поверхня стійкості підкріпленої тришарової конструкції «циліндр-конус-циліндр»**

Так само, як і в [2; 3; 8], для розглянутих типів конструкцій граничні поверхні є опуклими: збільшення осевого стискаючого зусилля і крутного моменту призводить до зменшення критичного зовнішнього тиску.



**Рис. 5. Вплив параметрів жорсткості стикувальних шпангоутів на стійкість конструкції «циліндр-конус»**

**Вплив жорсткості шпангоутів на стійкість конструкції «циліндр-конус».** На рис. 5 при  $M^* = 0, T^* = 0$  зображено графіки залежностей критичного тиску від параметра жорсткості  $G_1$  (в площині початкової кривизни) для наступних значень другого параметра  $G_2$  (з площини початкової кривизни): лінія 1 відповідає  $G_2 = 0$ , лінія 2 –  $G_2 = 10$ , лінія 3 –  $G_2 = 30$ . Збільшення значень обох параметрів жорсткості шпангоутів призводить до збільшення критичного тиску загальної втрати стійкості конструкції. При цьому, збільшення параметра жорсткості  $G_1$  в площині початкової кривизни шпангоута понад значення 500 призводить до незначного збільшення критичного тиску, що дозволяє обирати раціональне значення жорсткості для зменшення загальної маси конструкції «циліндр-конус». Аналогічний висновок отримано у роботах [3; 8].

**Візуалізація закритичного деформування складених оболонкових конструкцій.** У табл.

Таблиця 2

**Хвилеутворення при втраті стійкості конструкції «циліндр-конус» з параметрами  $\alpha = 75^\circ, l_0/l_1 = 0.65, L_1/R_1 = 2.5$**

$G_1 = 0, G_2 = 0$						
	$M^* = 0$			$M^* = 10$		$M^* = 5$
$T^*$	-3	0	2	-3	0	2
$n$	4	4	4	4	4	4
$q^*$	5.635779	4.402812	3.596839	4.684199	2.593891	2.69176
$\gamma_1$	0	0	0	0.131	0.218	0.219
$G_1 = 5000, G_2 = 10$						
	$M^* = 0$			$M^* = 10$		$M^* = 5$
$T^*$	-3	0	2	-3	0	2
$n$	6	6	6	7	5	6
$q^*$	11.55768	7.914187	5.478108	10.75653	6.161440	5.130847
$\gamma_1$	0	0	0	0.097	0.256	0.169

2 наведено параметри критичних зусиль, а також надана візуалізація форм випинання в результаті втрати стійкості невідкріплених та відкріплених конструкцій типу «циліндр-конус».

У випадку невідкріпленої конструкції «циліндр-конус» під дією зовнішнього тиску та осевого зусилля форма втрати стійкості характеризується гребнем хвилі, який розміщується в межах стикування секцій. Додатковий вплив крутіння призводить до пересування гребня в бік циліндричної секції.

Під впливом підкріплюючих шпангоутів обраної жорсткості хвиля зазнає перегину в місці стикування секцій. За відсутності крутного моменту максимум хвилі розміщується на конічній секції, при цьому, осьове розтягування призводить до візуалізації розтягування хвилі вздовж твірної. За певної комбінації значень крутного моменту та осевого зусилля, при  $T^* \geq 0$  хвилює число  $n$  може зменшитися, а максимум хвилі пересунується на циліндричну секцію, а при  $T^* < 0$  число  $n$  може збільшитися, а максимум хвилі залишиться на конічній секції.

Розглянемо оболонкову конструкцію «циліндр-конус-циліндр» з параметрами  $\alpha = 75^\circ, l_0/l_1 = 0.65, L_1/R_1 = L_2/R_2 = 2.5$ , для якої в табл. 3 наведено візуалізацію хвилеутворення за різного характеру підкріплення.

Таблиця 3

**Вплив підкріплюючих шпангоутів на хвилеутворення при втраті стійкості конструкції «циліндр-конус-циліндр»**

Відсутнє підкріплення шпангоутами: $G_1 = 0, G_2 = 0$						
	$M^* = 0$			$M^* = 10$		$M^* = 5$
$T^*$	-3	0	2	-3	0	2
$n$	3	3	3	3	3	3
$q^*$	1.669903	1.193405	0.848489	1.124695	0.212909	0.152743
$\gamma_1$	0	0	0	0.119	0.176	0.184
Підкріплення стикувальними шпангоутами меншого радіусу: $G_1 = 5000, G_2 = 10$						
	$M^* = 0$			$M^* = 10$		$M^* = 5$
$T^*$	-3	0	2	-3	0	2
$n$	4	4	4	4	4	4
$q^*$	3.135151	2.223881	1.651559	2.675035	1.920431	0.925142
$\gamma_1$	0	0	0	0.106	0.121	0.19
$G_1 = 5000, G_2 = 10, M^* = 0$						
	Підкріплення стикувальними шпангоутами більшого радіусу			Підкріплення стикувальними шпангоутами за обома спряженнями		
$T^*$	-3	0	2	-3	0	2
$n$	6	5	5	6	5	5
$q^*$	5.218293	3.958484	2.787854	5.219495	3.968583	2.792508
Підкріплення стикувальними шпангоутами за обома спряженнями: $G_1 = 5000, G_2 = 10$						
	Жорсткості всіх стикувальних шпангоутів – $G_1, G_2$		Жорсткості малих шпангоутів – $0.1G_1, 0.1G_2$ , великих – $G_1, G_2$		Жорсткості малих шпангоутів – $G_1, G_2$ , великих – $0.1G_1, 0.1G_2$	
	$M^* = 10$	$M^* = 5$	$M^* = 10$	$M^* = 5$	$M^* = 10$	$M^* = 5$
$T^*$	0	2	0	2	0	2
$n$	6	5	6	5	6	5
$q^*$	2.869121	2.330532	2.868800	2.326321	2.776833	2.141338
$\gamma_1$	0.2042	0.1570	0.2043	0.1572	0.2047	0.1594

Якщо конструкція обраних розмірів не підкріплена, спостерігаємо розтягування хвилі вздовж всіх трьох секцій конструкції. Розміщення шпангоутів з меншої основи конуса призводить до зсуву гребня на конічну та циліндричну секції більшого радіусу. Підкріплення конструкції стиковальними шпангоутами з більшими радіусами чи шпангоутами як більшого, так і меншого радіусів, візуально мало відрізняється за розподілом хвилі, гребінь якої розміщується над циліндром більшого радіусу. До того ж, у останніх випадках підкріплення, значення жорсткості шпангоутів та значення осьового зусилля несуттєво впливають на форму окремої хвилі, проте впливають на кількість хвиль  $n$ , значення критичного тиску  $q^*$  та параметр  $\gamma_1$  нахилу гребня хвилі до твірної конструкції. Більший вплив на стійкісні характеристики визначають жорсткості великих шпангоутів.

Зважаючи на те, що на конструкції, підкріпленій шпангоутами за обома спряженнями секцій, гребінь хвилі розміщується над циліндричною секцією більшого радіусу, саме на ній потрібно розмістити проміжний шпангоут.

Аналіз ефективного з точки зору стійкості місця розміщення проміжного шпангоута. Розглянемо оболонкову конструкцію «циліндр-конус-циліндр» з тими самими параметрами, що й вище. В табл. 4 і 5 внесені характеристики стійкості та візуалізовано форми втрати стійкості залежно від місця розміщення проміжного шпангоута, яке визначається коефіцієнтом  $k_{cyl}$  поділу твірної циліндричної секції більшого радіусу.

Для конструкції, підкріпленої стиковальними шпангоутом на обох спряженнях, частина хвилі з найбільшою амплітудою розміщується на циліндричному відсіку більшого радіусу. При постановці проміжного шпангоута на цей відсік конструкція підсилюється, в результаті змінюється форма хвилі залежно від місця розміщення шпангоута. В табл. 4 і 5 найбільші значення критичного тиску виділено жирним шрифтом у кожному з розглянутих випадків жорсткості проміжного шпангоута. Зауважимо, що розміщенню проміжного шпангоута посередині відсіку не відповідає найбільше значення критичного тиску.

Слід зазначити, що перепади в амплітудах критичної хвилі можуть вплинути на руйнівні процеси конструкції в наслідок втрати стійкості. У кожному з досліджених варіантів жорсткостей шпангоутів саме у випадках, де значення критичного тиску найбільше, хвиля має рівні амплітуди на частинах циліндричного відсіку більшого радіусу, що відповідає прийнятнішій формі хвилеутворення. Обираємо ці конструкції.

Жорсткість проміжного шпангоута визначає перерозподіл хвилі вздовж відсіків. В обох таблицях 4 і 5 саме другі з розглянутих варіантів обра-

них конструкцій відповідають більш рівномірному розподілу хвилі вздовж твірної у порівнянні з іншими: амплітуди хвилі над всіма циліндричними секціями близькі за значеннями (табл. 4) або мало відрізняються (табл. 5). Така поведінка хвилі є *безпечнішою* за інші випадки, хоча не відповідає більшим значенням критичного тиску у порівнянні з третім варіантом конструкції в табл. 4 та 5.

Таблиця 4

**Аналіз розміщення проміжного шпангоута на конструкції «циліндр-конус-циліндр», підкріпленій стиковальними шпангоутом за обома спряженнями, якщо жорсткості малих шпангоутів –  $G_1, G_2$ , великих –  $0.1G_1, 0.1G_2$**

$G_1 = 5000, G_2 = 10, T^* = 0, M^* = 0$				
Жорсткості проміжного шпангоута – $0.2G_1, 0.2G_2$				
$k_{cyl}$	0.5	0.53	0.55	0.6
$q^*$	6.617245 ( $n=7$ )	<b>6.736068</b> ( $n=7$ )	6.679096 ( $n=7$ )	6.345322 ( $n=7$ )
Жорсткості проміжного шпангоута – $0.25G_1, 0.25G_2$				
$k_{cyl}$	0.528	0.53	0.55	0.6
$q^*$	<b>7.040914</b> ( $n=7$ )	7.040364 ( $n=7$ )	6.914612 ( $n=7$ )	6.487056 ( $n=7$ )
Жорсткості проміжного шпангоута – $0.3G_1, 0.3G_2$				
$k_{cyl}$	0.525	0.53	0.55	0.6
$q^*$	<b>7.250784</b> ( $n=7$ )	7.211005 ( $n=7$ )	7.066503 ( $n=7$ )	6.586552 ( $n=7$ )

Таблиця 5


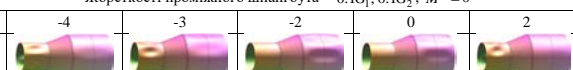
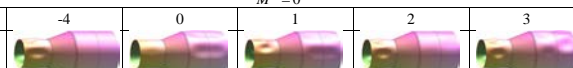
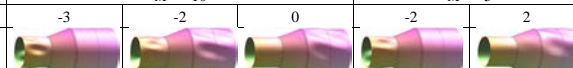
**Аналіз розміщення проміжного шпангоута на конструкції «циліндр-конус-циліндр», підкріпленій стиковальними шпангоутами за обома спряженнями з жорсткостями  $G_1, G_2$**

$G_1 = 5000, G_2 = 10, T^* = 0, M^* = 0$				
Жорсткості проміжного шпангоута – $0.1G_1, 0.1G_2$				
$k_{cyl}$	0.5	0.53	0.55	0.6
$q^*$	5.940621 ( $n=7$ )	6.007339 ( $n=7$ )	<b>6.021317</b> ( $n=7$ )	5.944031 ( $n=7$ )
Жорсткості проміжного шпангоута – $0.2G_1, 0.2G_2$				
$k_{cyl}$	0.5	0.53	0.545	0.6
$q^*$	6.617234 ( $n=7$ )	6.831298 ( $n=7$ )	<b>6.871317</b> ( $n=7$ )	6.571257 ( $n=7$ )
Жорсткості проміжного шпангоута – $0.25G_1, 0.25G_2$				
$k_{cyl}$	0.5	0.53	0.54	0.55
$q^*$	6.835166 ( $n=7$ )	7.146180 ( $n=7$ )	<b>7.201648</b> ( $n=7$ )	7.201116 ( $n=7$ )

Для деяких конструкцій з таблиць 4 та 5 проведено комп'ютерну візуалізацію закритичного хвилеутворення підкріпленої конструкції «циліндр-конус-циліндр», під впливом осьового зусилля та/або крутіння. Результати розрахунків та візуалізації наведено в табл. 6.



Таблиця 6  
**Вплив комбінованого навантаження на закритичне хвилеутворення конструкції «циліндр-конус-циліндр», підкріпленої стиковальними шпангоутом за обома**

Жорсткості малих стиковальних шпангоутів – $G_1, G_2$ , великих – $0.1G_1, 0.1G_2$ $G_1 = 5000, G_2 = 10, k_{cyl} = 0.53$					
Жорсткості проміжного шпангоута – $0.25G_1, 0.25G_2$					
	$M^* = 0$		$M^* = 10$		$M^* = 5$
$T^*$	-4	2	-3	0	2
					
$n$	8	7	8	7	6
$q^*$	8.040517	5.233317	7.692357	5.698601	4.803548
$\gamma_1$	0	0	0.101	0.233	0.260
Жорсткості всіх стиковальних шпангоутів – $G_1, G_2$ $G_1 = 5000, G_2 = 10, k_{cyl} = 0.55$					
Жорсткості проміжного шпангоута – $0.1G_1, 0.1G_2$ ; $M^* = 0$					
$T^*$	-4	-3	-2	0	2
					
$n$	7	7	7	7	7
$q^*$	7.726618	7.326877	6.893854	6.021317	5.107804
Жорсткості проміжного шпангоута – $0.2G_1, 0.2G_2$					
	$M^* = 0$				
$T^*$	-4	0	1	2	3
					
$n$	7	7	7	7	7
$q^*$	8.062541351	6.868018	6.284147	5.395219	4.258257
	$M^* = 10$		$M^* = 5$		
$T^*$	-3	-2	0	-2	2
					
$n$	8	8	7	7	7
$q^*$	7.634454	7.136206	5.484937	7.625022	5.556492

Під впливом розтягувальної сили гребінь хвилі пересувається на циліндричну секцію малого радіусу. Для деяких конструкцій стискаюча сила може призвести до пересування хвилі на циліндричну секцію більшого радіусу.

Зазначимо, що за певної комбінації зовнішніх зусиль може спостерігатися виникнення хвилі, яка отримує перегин при переході через проміжний шпангоут (перша та третя конструкції табл. 6), що задає значний перепад амплітуд. Крім того, перерозподіл хвилі вздовж циліндричного відсіку більшого радіусу зі стану відсутності хвилі з перегином при переході через проміжний шпангоут до його появи супроводжується підвищенням гребінця хвилі над циліндричним відсіком меншого радіусу.

Аналіз хвилеутворень втрати стійкості, наведених в табл. 6, дозволяє також обрати ефективне сполучення жорсткостей шпангоутів, за яких втрата стійкості призводить до найбезпечнішого розподілу хвилі незалежно від комбінації зовнішніх зусиль. У досліджених варіантах найприйнятнішою є друга конструкція табл. 6 (з жорсткостями всіх стиковальних шпангоутів  $G_1, G_2$ , проміжного –  $0.1G_1, 0.1G_2$ , з коефіцієнтом поділу циліндричного відсіку більшого радіусу проміжним шпангоутом  $k_{cyl} = 0.55$ ).

Таблиця 7

**Вплив характеристик шарів матеріалу оболонки на стійкість конструкції ( $\alpha = 75^\circ, l_0/l_1 = 0.65, k = 2.5, E_1 = E_2, h_1 = h_2, M^* = 0, T^* = 0$ )**

Непідкріплена конструкція «циліндр-конус»						
$E_3/E_1 = 0.01$			$E_3/E_1 = 0.001$			
$h_3/h_0$	$q^*$ [Па]	$E \cdot 10^{-10}$ [Па]	$10^6 \cdot q/E$	$q^*$ [Па]	$E \cdot 10^{-10}$ [Па]	$10^6 \cdot q/E$
0.1	6.1551	9.3704	6.5686	6.1538	9.3610	6.5738
0.2	5.9832	8.3408	7.1734	5.9803	8.3221	7.1861
0.3	5.7506	7.3112	7.8654	5.7455	7.2831	7.8888
0.4	5.4284	6.2816	8.6418	5.4204	6.2442	8.6807
0.5	4.9885	5.2520	9.4982	4.9762	5.2052	9.5601
0.6	4.4028	4.2224	10.4273	4.3851	4.1662	10.5252
0.7	3.6442	3.1928	11.4138	3.6193	3.1273	11.5733
0.8	2.6858	2.1632	12.4160	2.6519	2.0883	12.6986
0.9	1.5014	1.1336	13.2444	1.4563	1.0494	13.8781
Підкріплені конструкції, $G_1 = 5000, G_2 = 10$						
«циліндр-конус»			«циліндр-конус-циліндр»; для малих шп. – $G_1, G_2$ , великих – $0.1G_1, 0.1G_2$			
$E_3/E_1 = 0.01$		$E_3/E_1 = 0.001$		$E_3/E_1 = 0.01$		$E_3/E_1 = 0.001$
$h_3/h_0$	$q^*$ [Па]	$10^6 \cdot q/E$	$q^*$ [Па]	$10^6 \cdot q/E$	$q^*$ [Па]	$10^6 \cdot q/E$
0.1	11.6035	12.3831	11.6011	12.3930	5.4237	5.7882
0.2	11.2813	13.5255	11.2760	13.5495	5.2932	6.3461
0.3	10.8436	14.8315	10.8342	14.8758	5.1085	6.9873
0.4	10.1410	16.1439	10.1159	16.2006	4.7930	7.6303
0.5	9.1332	17.3900	9.0988	17.4802	4.3137	8.2135
0.6	7.9142	18.7433	7.8685	18.8862	3.7367	8.8496
0.7	6.4439	20.1826	6.3845	20.4155	3.0423	9.5286
0.8	4.6827	21.6470	4.6070	22.0606	2.2112	10.2221
0.9	2.5913	22.8593	2.4962	23.7879	1.2241	10.7979

**Вплив параметрів шарів матеріалу оболонки на стійкість конструкцій.** В табл. 7 випи-сано значення критичного тиску  $q^*$ , приведеного модуля пружності  $E$  та безрозмірного тиску  $q/E$  для різних значень відносної товщини  $h_3/h_0$  та модуля пружності  $E_3/E_1$  внутрішнього шару матеріалу тришарової оболонки.

Розрахунки проведені для непідкріпленої та підкріплених конструкцій типу «циліндр-конус» та «циліндр-конус-циліндр». Для зазначених типів конструкцій отримуємо висновок про зменшення критичного тиску  $q^*$  та збільшення параметра  $q/E$  як при «пом'якшенні» внутрішнього шару (зменшення  $E_3/E_1$ ) за фіксованої його товщини, так і при зростанні товщини внутрішнього шару  $h_3/h_0$  за фіксованого значення  $E_3/E_1$ . Щодо поведінки параметра  $q/E$ , то вона аналогічна випадкам як конічної оболонки [2], так і конструкції «конус-циліндр», що має спряження вздовж основи конуса більшого радіусу [3]. Стосовно тиску  $q^*$ , то для конструкції «конус-циліндр», розглянутої в роботі [3], зростання  $q^*$  спостерігалося не на всьому діапазоні зміни товщини  $h_3/h_0$ . Це пов'язано з геометрією конструкції: в роботі [3] вона має опукле спряження, а в даній роботі – одне зі спряжень є увігнутим.

**Вплив розмірів циліндричних секцій на закритичне хвилеутворення.** Розглядатимемо підкріплені конструкції «циліндр-конус-циліндр» з жорсткостями всіх стикувальних шпангоутів  $G_1, G_2$ . В табл. 8 візуалізовано форми втрати стійності зазначеної конструкції «циліндр-конус-циліндр» для різних розмірів циліндричних секцій. Як можна спостерігати, гребінь хвилі не завжди розміщується на секції більшої довжини.

Тепер розглянемо підкріплену конструкцію «циліндр-конус-циліндр» з циліндричними секціями, що мають вдвічі більшу довжину за ту, що наводилася в табл. 4-6. Уведемо позначення для коефіцієнта жорсткості проміжного шпангоута по відношенню до жорсткості стикувальних:  $k_{G,int} = G_{1,int}/G_1 = G_{2,int}/G_2$ . Проведено аналіз впливу місця розміщення проміжного шпангоута на характер втрати стійкості з вибором таких параметрів, за яких хвиля має майже однакову абсолютну амплітуду з обох боків від проміжного шпангоута на циліндричному відсіку більшого радіусу. В табл. 9 наведено результат такого вибору. У випадках  $k_{G,int} = 0.35$  та  $0.5$  спостерігається перегин хвилі при переході через проміжний шпангоут.

Для другої та третьої з наведених в табл. 9 конструкцій розглянемо вплив осьових зусиль та крутіння на характер хвилеутворення втрати стійкості. Результати візуалізації зведено до табл. 10.

Для обраних конструкцій в табл. 10 за наявності осьового стискання без крутіння обидві кон-

струкції отримують перегин хвилі на циліндричному відсіку більшого радіусу при переході через проміжний шпангоут. Для другої з розглянутих конструкцій табл. 10, такого типу перегин спостерігався ще й при  $T^* = 0$ , а для першої – лише при  $T^* > 0.7$ .

Таблиця 8

**Вплив розмірів циліндричних секцій на закритичне хвилеутворення при  $l_0/l_1 = 0.8, G_1 = 5000, G_2 = 10$**

	$L_1/R_1$	$L_2/R_2$	$L_1/R_1$	$L_2/R_2$	$L_1/R_1$	$L_2/R_2$
	2.5	2.5	4	2.5	5	2.5
$q^*$	3.997107 (n=5)		3.997071 (n=5)		3.413275 (n=5)	
	5	3	2.5	5	5	5
$q^*$	3.1792789 (n=5)		1.875588 (n=5)		1.875453 (n=5)	

Таблиця 9

**Рациональне розміщення проміжного шпангоута на конструкції «циліндр-конус-циліндр» залежно від коефіцієнта  $k_{G,int}$  при  $l_0/l_1 = 0.65, G_1 = 5000, G_2 = 10, L_1/R_1 = L_2/R_2 = 5, T^* = 0, M^* = 0$**

$k_{G,int}$	0.2	0.25	0.35	0.5
$k_{cyl}$	0.5456	0.5445	0.5424	0.54
$q^*$	3.227675 (n=5)	3.370491 (n=5)	3.597736 (n=5)	3.644468 (n=5)

Крутіння другої конструкції призводить до поступового перерозподілу хвилі у першу чергу на обох циліндричних відсіках. Виявлено, що при досить незначному крутінні  $M^* = 0.5$  гребінь хвилі розміщується на циліндричному відсіку меншого радіусу, а при збільшенні крутіння спостерігається поступове зниження гребінця на цьому відсіку, а також зникнення перегину хвилі на відсіку більшого радіусу при переході через проміжний шпангоут.

Аналогічно до випадку оболонок, наведених в табл. 6, для обох конструкцій табл. 10 перерозподіл хвилі вздовж циліндричного відсіку більшого радіусу зі стану з перегином при переході через проміжний шпангоут до його зникнення і навпаки супроводжується підвищенням гребня хвилі над циліндричним відсіком меншого радіусу. До того ж, цей гребінь сконцентрований в околі центрального поясу циліндричного відсіку меншого радіусу. Для кожної з розглянутих конструкцій потрібно відслідковувати поведінку оболонки у зазначеному «перехідному стані». Для першої конструкції табл. 10 «перехідний стан» проходить у пом'якшеній формі на відміну від другої. Тому безпечніша поведінка втрати стійкості під впливом комбінованого навантаження відповідає

першій конструкції, яка, крім того, має критичний тиск, який несуттєво менший, ніж у другої конструкції.

Таблиця 10

**Вплив комбінованого навантаження на закритичне хвилеутворення конструкцій «циліндр-конус-циліндр» з параметрами**

$$l_0/l_1 = 0.65, L_1/R_1 = L_2/R_2 = 5, G_1 = 5000, G_2 = 10$$

$M^*$	10	0	0	5
$T^*$	-4	0.5	2	2
$k_{cyl} = 0.5445, k_{G,ant} = 0.25$				
$q^*$	3.625217 (n=6)	3.242451 (n=5)	2.487865 (n=5)	1.905255 (n=5)
$\gamma_1$	0.119	0	0	0.234
$k_{cyl} = 0.5424, k_{G,ant} = 0.35$				
$M^* = 0, \gamma_1 = 0$				
$T^*$	-4	-0.1	0.1	2
$q^*$	4.692904 (n=6)	3.629264 (n=5)	3.544339 (n=5)	2.517162 (n=5)
$M^*$	10	0.5	1	5
$T^*$	-4	0	0	2
$q^*$	3.800933 (n=6)	3.593776 (n=5)	3.578727 (n=5)	2.093536 (n=5)
$\gamma_1$	0.119	0.018	0.042	0.229

При аналізі хвилеутворення враховано, що перепади в амплітудах хвилі закритичного випинання можуть призвести до руйнівних процесів. Потрібно обрати таку комбінацію жорсткостей шпангоутів та місця розміщення проміжного шпангоута, за якої хвиля найбільш рівномірно розподілена вздовж твірної. Значне збільшення жорсткості шпангоутів призводить до несуттєвого збільшення критичного тиску, проте може викликати суттєві перепади в амплітудах. Таким чином комп'ютерна візуалізація та аналіз хвилеутворення дозволяє вибрати раціональну комбінацію жорсткостей шпангоутів як з точки зору безпечної поведінки розподілу хвилі вздовж

твірної конструкції в закритичному стані, так і з точки зору зменшення загальної маси конструкції. При такому виборі важливо провести візуалізацію хвилеутворення під впливом комбінованого навантаження для відслідковування перехідних етапів в перерозподілі хвилі, який може супроводжуватися таким випинанням хвилі, за якого конструкція може зруйнуватися.

Наприкінці зауважимо, що оболонкові конструкції з однаковими параметрами жорсткості та геометричними характеристиками конічного відсіку, мають більший критичний тиск, якщо у них розмір циліндричних відсіків менший. Той самий висновок справджується і у порівнянні критичного тиску для конструкцій «циліндр-конус» та «циліндр-конус-циліндр» з однаковими жорсткостями шпангоутів: перша має більший критичний тиск за другу.

**Висновки.** В роботі надано алгоритм побудови каркасу закритичного стану оболонкової конструкції, отриманого на основі розрахунків стійкості методом скінченних різниць, наведено поетапну схему візуалізації форм втрати стійкості, реалізовану за допомогою системи комп'ютерної математики Maple17. Ця система дозволила швидко, без великих витрат ресурсів машинного часу та якісно побудувати низку форм втрати стійкості оболонкових конструкцій для різних входних параметрів.

В роботі проведено аналіз біфуркаційних станів тришарових складених оболонкових конструкцій, що утворюються з циліндричних та конічної секцій під дією комбінованого навантаження зовнішнім тиском, осьовим зусиллям та крутінням.

Проведено візуалізацію хвилеутворення і виявлені раціональні параметри досліджуваної системи з точки зору загальної втрати стійкості конструкції в цілому.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Congying Zhong C., Reimerdes H.-G. Stability Behavior of Cylindrical and Conical Sandwich Shells with Flexible Core. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2007, Vol. 9. No. 2, March 2007. P. 143–166. URL: <https://doi.org/10.1177/1099636207068687>.
2. Gristchak V. Z., Hryshchak D. D., Dyachenko N. M. Efficient Approximate Analytic Solution for the Problem of Stability of a Three-Layer Conic Shell Under Combined Loading. *Journal of Mathematical Sciences*. 2021. Vol. 254. No. 1. P. 71–88. URL: <https://doi.org/10.1007/s10958-021-05289-3>.
3. Gristchak V. Z., Hryshchak D. V., Dyachenko N. M., Sanin A. F., Sukhyu K. M. Bifurcation state and rational design of three-layer reinforced compound cone-cylinder shell structure under combined loading. *Space Science and Technology*. 2023. Vol. 29. No. 6(145). P. 26–41. URL: <https://doi.org/10.15407/knit2023.06.026>.
4. Столярова А.В. Эффективные механические характеристики композиционных материалов из транслопными порожнистыми волокнами : монография. Херсон : Видавничий дім «Гельветика», 2021. 104 с.
5. Slyvynskiy V. I., Sanin A. F., Kharchenko M. E., Kondratyev A. V. Thermally and dimensionally stable structures of carbon-carbon laminated composites for space applications. *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC this link is disabled*. 2014. Vol. 8. P. 5739–5751. URL: <https://www.researchgate.net/publication/295549483>.

6. Singer J, Arbocz J, Weller T. Buckling experiments: experimental methods in buckling of thin-walled structures, volume 2. Shells, built-up structures, composites, and additional topics. Wiley, New York, 2002. 1132 p.
7. Грищак Д.В. Комп'ютерна алгебра у розв'язанні прикладних задач механіки конструкцій зі змінними параметрами: монографія. Херсон : Видавничий дім «Гельветика», 2020. 218 с.
8. Дегтярьов О.В., Грищак В.З., Акімов Д.В. та ін. Математичні моделі та прогнозування руйнівних навантажень в ракетно-космічних системах : колективна монографія / за ред. О. В. Дегтярьова, В. З. Грищака, В. М. Сіренка. Запоріжжя : Видавничий дім «Гельветика», 2020. 260 с.
9. Ifayefunmi O., Ismail M. S. An Overview of Buckling and Imperfection of Cone-Cylinder Transition under Various Loading Condition. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2020. Vol. 17. No. 8. E329. URL: <https://doi.org/10.1590/1679-78256197>.
10. Ifayefunmi O., Ruan D. Buckling of Stiffened Cone–Cylinder Structures Under Axial Compression. *International Journal of Applied Mechanics*. 2022. Vol. 14. No. 07. Id: 2250075. URL: <https://doi.org/10.1142/S1758825122500752>.
11. Iqbal, M. A., Tiwari, G., Gupta, P. K. Energy dissipation in thin metallic shells under projectile impact. *European Journal of Mechanics - A/Solids*. 2016. No. 59. P. 37–57. URL: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.03.004>.
12. Ismail M. S., Ifayefunmi O., Mazli A. H. Combined stability of cone-cylinder transition subjected to axial compression and external pressure. *Thin-Walled Structures*. 2020. Vol. 157. December 2020. Id: 107102. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107102>.
13. Ismail M.S., Ifayefunmi O., Fadzullah S.H.S.M. Buckling Analysis of Stiffened Cone-Cylinder Intersection Subjected to External Pressure. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 833. March 2020. P. 223–227. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.833.223>.
14. Khalili F., Showkati H. T-ring stiffened cone cylinder intersection under internal pressure. *Thin-Walled Structures*. 2012. Vol. 54. May 2012. P. 54–64. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.01.015>.
15. Pasternak H., Li Z., Juozapaitis A., Daniūnas A. Ring Stiffened Cylindrical Shell Structures. *Appl. Sci*. 2022. Vol. 12. No. 22. Id: 11665. URL: <https://doi.org/10.3390/app122211665>.
16. Schmidt H. Two decades of research on the stability of steel shell structures at the University of Essen (1985–2005): Experiments, evaluations, and impact on design standards. *Advances in Structural Engineering*. 2018. Vol. 21. No. 16. P. 2364–2392. URL: <https://doi.org/10.1177/1369433218756273>.
17. Teng J. G., Barbagallo M. Shell restraint to ring buckling at cone-cylinder intersections. *Engineering Structures*. 1997. Vol. 19. No. 6. P. 425–431. URL: [https://doi.org/10.1016/s0141-0296\(96\)00087-9](https://doi.org/10.1016/s0141-0296(96)00087-9).
18. Wang A. Stresses and stability for the cone-cylinder shells with toroidal transition. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1998. Vol. 75. No. 1. P. 49–56. URL: [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(98\)00013-1](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(98)00013-1).
19. Kamke E. Differentialgleichungen, Bd. 1, Gewöhnliche Differentialgleichungen Hardcover – 1. Springer Fachmedien Wiesbaden GMBH, Jan., 1983. 696 p.

## REFERENCES

1. Congying Zhong C., Reimerdes H.-G. (2007) Stability Behavior of Cylindrical and Conical Sandwich Shells with Flexible Core. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 9, no. 2, March 2007. 143-166. <https://doi.org/10.1177/1099636207068687>
2. Gristchak V. Z., Hryshchak D. D., Dyachenko N. M. (2021) Efficient Approximate Analytic Solution for the Problem of Stability of a Three-Layer Conic Shell Under Combined Loading. *Journal of Mathematical Sciences*, vol. 254, no. 1, pp. 71-88. <https://doi.org/10.1007/s10958-021-05289-3>
3. Gristchak V. Z., Hryshchak D. V., Dyachenko N. M., Sanin A. F., Sukhyy K. M. (2023) Bifurcation state and rational design of three-layer reinforced compound cone-cylinder shell structure under combined loading. *Space Science and Technology*, vol. 29, no. 6 (145), pp. 26–41. <https://doi.org/10.15407/knit2023.06.026>
4. Stoliarova A. V. (2021) Efektyvni mekhanichni kharakterystyky kompozytsiinykh materialiv iz transtropnymy porozhnystymy voloknamy: monohrafia [Effective mechanical characteristics of composite materials with transtropic hollow fibers: monograph]. Kherson: Publishing House 'Helvetica' LLC [in Ukrainian].
5. Slyvynskiy V. I., Sanin A. F., Kharchenko M. E., Kondratyev A. V. (2014) Thermally and dimensionally stable structures of carbon-carbon laminated composites for space applications. *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC* this link is disabled, vol. 8, pp. 5739–5751. <https://www.researchgate.net/publication/295549483>

6. Singer J, Arbocz J, Weller T. (2002) Buckling experiments: experimental methods in buckling of thin-walled structures, volume 2. Shells, built-up structures, composites, and additional topics. Wiley, New York.
7. Hryshchak D.V. (2020) Kompiuterna alhebra u rozviazanni prykladnykh zadach mekhaniky konstrukttsii zi zminnyimi parametramy: monohrafiia [Application of computer algebra to the solution of applied problems of mechanics of structures with variable parameters: monograph]. Kherson: Publishing House 'Helvetica' LLC [in Ukrainian].
8. Degtyarev A. V., Gristchak V. Z., Akimov D. V., Gomenyuk S. I., Grebenyuk S. M., Degtiarenko P. G., Dyachenko N. M., Klimenko D. V., Kudin O. V., Larionov I. F., Sirenko V. N., Choporov S. V. ((2020) Matematychni modeli ta prohnouzuvannia ruiniivnykh navantazhen v raketno-kosmichnykh systemakh: kolektyvna monohrafiia [Mathematical models and prediction of damage loads in rocket-space systems: collective monograph]. Eds by A. V. Degtyarev, V. Z. Gristchak, V. N. Sirenko. Zaporizhzhia: Publishing House 'Helvetica' LLC [in Ukrainian].
9. Ifayefunmi O., Ismail M. S. (2020) An Overview of Buckling and Imperfection of Cone-Cylinder Transition under Various Loading Condition. Latin American Journal of Solids and Structures, vol. 17, no. 8. E329. <https://doi.org/10.1590/1679-78256197>
10. Ifayefunmi O., Ruan D. (2022) Buckling of Stiffened Cone–Cylinder Structures Under Axial Compression. International Journal of Applied Mechanics, vol. 14, no. 07. Id: 2250075. <https://doi.org/10.1142/S1758825122500752>
11. Iqbal, M. A., Tiwari, G., Gupta, P. K. (2016) Energy dissipation in thin metallic shells under projectile impact. European Journal of Mechanics - A/Solids, no. 59, pp. 37–57. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.03.004>
12. Ismail M. S., Ifayefunmi O., Mazli A. H. (2020) Combined stability of cone-cylinder transition subjected to axial compression and external pressure. Thin-Walled Structures, vol. 157. December 2020. Id: 107102. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107102>
13. Ismail M.S., Ifayefunmi O., Fadzullah S.H.S.M. (2020) Buckling Analysis of Stiffened Cone-Cylinder Intersection Subjected to External Pressure. Key Engineering Materials, vol. 833. March 2020, pp. 223–227. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.833.223>
14. Khalili F., Showkati H. (2012) T-ring stiffened cone cylinder intersection under internal pressure. Thin-Walled Structures, vol. 54. May 2012, pp. 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.01.015>.
15. Pasternak H., Li Z., Juozapaitis A., Daniūnas A. (2022) Ring Stiffened Cylindrical Shell Structures. Appl. Sci, vol. 12, no. 22. Id: 11665. <https://doi.org/10.3390/app122211665>
16. Schmidt H. (2018) Two decades of research on the stability of steel shell structures at the University of Essen (1985–2005): Experiments, evaluations, and impact on design standards. Advances in Structural Engineering, vol. 21, no. 16, pp. 2364–2392. <https://doi.org/10.1177/1369433218756273>.
17. Teng J. G., Barbagallo M. (1997) Shell restraint to ring buckling at cone-cylinder intersections. Engineering Structures, vol. 19, no. 6, pp. 425–431. [https://doi.org/10.1016/s0141-0296\(96\)00087-9](https://doi.org/10.1016/s0141-0296(96)00087-9).
18. Wang A. (1998) Stresses and stability for the cone-cylinder shells with toroidal transition. International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol. 75, no. 1, pp. 49-56. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(98\)00013-1](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(98)00013-1)
19. Kamke E. (1983) Differentialgleichungen, Bd. 1, Gewöhnliche Differentialgleichungen Hardcover – 1. Springer Fachmedien Wiesbaden GMBH, Jan.

## РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ ІОТ СИСТЕМИ ВІДДАЛЕНОГО УПРАВЛІННЯ ПРИБОРАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАТФОРМИ ESP32

**Драєвський Д. С.**

*викладач*

*Відокремлений структурний підрозділ «Економіко-правничий фаховий коледж*

*Запорізького національного університету»*

*вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна*

*orcid.org/0009-0008-3810-6595*

*draevskdmitry@gmail.com*

**Мухін В. В.**

*кандидат технічних наук, доцент,*

*доцент кафедри програмної інженерії*

*Запорізький національний університет*

*вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна*

*orcid.org/0009-0007-0270-8239*

*comentssno@gmail.com*

**Ключові слова:** *інтернет речей, архітектура системи, мікроконтролер, проектування систем.*

Один з напрямів розвитку сучасного виробництва полягає у створенні так званих «розумних» пристроїв. Такі пристрої є основою новітніх концепцій Індустрії 4.0 та 5.0. Ці нові підходи з'явилися в результаті розвитку ідеї інтернету речей. Інтернет речей представляє революційну технологію, яка з'єднує фізичні об'єкти, датчиками, мікроконтролери та програмне забезпечення для збору даних та керування пристроями. Така інтеграція «розумних» пристроїв в життя та виробництво дозволяє автоматизувати рутинні завдання, що призводить до значного скорочення витрат і споживання енергії, тим самим сприяючи сталому розвитку та економічному зростанню. Основні сфери застосування ІоТ охоплюють різні сектори, включаючи промисловість, розумні міста, агропромисловість і логістику. Важливим напрямком розробки ІоТ є розробка оптимальної системної архітектури, яка підвищує безпеку, масштабованість і стійкість. Ефективні архітектури повинні включати шифрування та автентифікацію для захисту конфіденційних даних, забезпечення безперебійної інтеграції нових пристроїв і підтримки надійності в критично важливих умовах, зокрема, при раптовому зникненні електроживлення. Дослідження спрямоване на розробку оптимальної архітектури ІоТ системи і програмної реалізації для керування пристроями за допомогою платформи ESP32, вирішення таких завдань, як розробка схеми для автоматичної системи керування освітленням і впровадження програмного забезпечення для шаблонів керування освітленням. Проект включає такі ІоТ пристрої, як мікроконтролер ESP-WROOM-32, електромеханічні реле, світлодіодні лампи, детектор напруги з оптопарою, підвищуючий імпульсний перетворювач напруги; діоди Шотткі, конденсатор. Запропоновано алгоритм визначення стану системи із використанням електромеханічних реле та детектора напруги. Продемонстровано стійкість розробленої системи при раптовому зникненні енергозабезпечення.

## DEVELOPMENT OF IOT ARCHITECTURE OF REMOTE CONTROL SYSTEM OF DEVICES USING THE ESP32 PLATFORM

**Draevskii D. S.**

*Lecturer*

*Separate Structural Subdivision “Economic and Legal Vocational College of Zaporizhzhia National University”*

*Universytetska str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine*

*orcid.org/0009-0008-3810-6595*

*draevskdmity@gmail.com*

**Mukhin V.V.**

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,*

*Professor at the Department of Software Engineering*

*Zaporizhzhia National University,*

*Universytetska str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine*

*orcid.org/0009-0007-0270-8239*

*comentssno@gmail.com*

**Key words:** *Internet of Things, system architecture, microcontroller, system design.*

One of the key directions in modern manufacturing development is the creation of so-called “smart” devices, which form the basis of cutting-edge Industry 4.0 and 5.0 concepts. These new approaches have emerged as a result of the evolving Internet of Things (IoT) technology, which connects physical objects equipped with sensors, microcontrollers, and software to collect data and control devices. Integrating smart devices into everyday life and production enables the automation of routine tasks, leading to significant cost and energy reductions, thus promoting sustainable development and economic growth. The primary IoT application areas span diverse sectors, including industry, smart cities, agriculture, and logistics. A critical direction in IoT development is designing an optimal system architecture that enhances security, scalability, and resilience. Effective architectures should incorporate encryption and authentication to protect sensitive data, ensure seamless integration of new devices, and maintain reliability in critical conditions, particularly during unexpected power outages. This study focuses on developing an optimal IoT system architecture and software implementation for device management using the ESP32 platform, addressing tasks such as designing an automatic lighting control system and implementing control software. The project involves IoT devices like the ESP-WROOM-32 microcontroller, electromechanical relays, LED lamps, a voltage detector with an optocoupler, a boost converter, Schottky diodes, and a capacitor. An algorithm for system state determination using electromechanical relays and a voltage detector is proposed. The system’s resilience in case of sudden power loss is demonstrated.

**Вступ.** Інтернет речей (Internet of Things, IoT) – це поширена технологія, що передбачає з’єднання фізичних об’єктів, які мають вбудовані сенсори, програмне забезпечення та інші технології, з мережею для обміну даними між собою та іншими системами через Інтернет [1]. Автоматизація рутинних завдань з використанням інтелектуальних пристроїв дозволяє значно знизити витрати та енергоспоживання в промисловості та побуті, що сприяє сталому розвитку та економічному зростанню. Окрім напрямів застосування

IoT пов’язані із промисловістю, розвитком розумних міст, агропромисловістю, транспортом та логістикою тощо. Одним з важливих напрямів розвитку IoT систем є проектування та імплементація оптимальних архітектур, що могли б враховувати специфіку застосування у різних галузях.

Ефективна архітектура пристроїв інтернету речей та відповідного програмного забезпечення безпосередньо впливає на забезпечення безпеки, масштабованості та стійкості систем IoT. Зокрема, така архітектура повинна включати

засоби шифрування та автентифікації для захисту конфіденційних даних, зібраних з кількох підключених пристроїв. Масштабованість визначає здатність системи автоматично обробляти дані з нових пристроїв без необхідності змінювати програмний код. Здатність швидко відновлюватися після потенційних збоїв, забезпечуючи надійність важливих для життя та безпеки даних і додатків визначає стійкість систем IoT. Така оптимальна архітектура сприяє взаємодії різних пристроїв, зниженому енергоспоживанню, ефективній та безпечній обробці даних, тобто ключовим аспектам впровадження додатків Інтернету речей у різних галузях.

Об'єктом дослідження є процес розробки систем інтернету речей.

Метою даної роботи є розробка оптимальної архітектури системи та застосування інтернету речей для керування пристроями із використанням платформи ESP32 [1].

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі: спроектувати принципову схему пристроїв IoT на прикладі системи автоматичного керування світлом; розробити програмну реалізацію заданих шаблонів керування світлом.

Огляд літератури. Оглядова стаття [2] містить вичерпний огляд архітектур, технологій, протоколів і форматів даних, які найчастіше використовуються на сучасних платформах IoT. На цій основі було проведено порівняльний аналіз найпопулярніших відкритих платформ IoT.

У [3] були розглянуті типові архітектури систем Інтернету речей: трирівнева, сервіс-орієнтована архітектура та архітектура проміжного програмного забезпечення. Розглянуто основні елементи та особливості реалізації цих підходів.

У роботі [4] розглянуто сучасний стан розвитку різних архітектур IoT. У статті наведено детальну класифікацію систем IoT, зокрема: сумісність, масштабованість, безпека та енергоефективність. Крім того, було розглянуто важливість технологій блокчейну та великих даних та їх аналіз по відношенню до IoT.

Робота [5] містить огляд 167 публікацій. Розглянуто останні тенденції, поточний стан, останні розробки, виклики, безпеку, конфіденційність, застосування IoT та майбутні напрямки досліджень.

Систематичне дослідження сучасної архітектури IoT та основних напрямків досліджень представлено в [6]. Крім того, представлено класифікацію технічних проблем та специфіку впровадження систем IoT відповідно до включених досліджень. Ця модель класифікації може слугувати еталоном у майбутніх роботах.

Стаття [7] присвячена дослідженню проблеми експоненціального зростання обсягу даних, що

генеруються системами IoT. Враховуються такі особливості систем IoT, як обмеження ресурсів і енергії, неоднорідність пристроїв і даних, а також масштабованість. У таких інфраструктурах пропонується впроваджувати інтелектуальні засоби аналізу даних. Розглядаються особливості IoT систем на основі програмно визначеної мережі. Проведено детальне дослідження та критичний аналіз попередніх робіт, пов'язаних з аналізом даних IoT у програмно визначених мережах. Виконано критичний аналіз попередніх досліджень та запропоновано майбутні напрями розробок у цій галузі.

В [8] розглянуто методику створення проєктів для навчальних курсів на основі платформи ESP32. Детально описано проєкт системи моніторингу вуликів та пристрою моніторингу ферментації вина.

У роботі [9] запропоновано систему освітлення розумної кімнати із використанням методів нечіткої логіки на основі ESP32. Завдяки дизайну системи, вона може контролювати яскравість світло із різними заздалегідь визначеними рівнями. Продемонстровано, що розроблене IoT рішення може зменшити споживання електроенергії до 70%.

Дослідження спрямоване на комплексну оцінку та характеристику повнофункціональної сенсорної мережі, побудованої на основі мікроконтролера ESP32 виконано у [10]. Оцінка охоплює три ключові аспекти: продуктивність мережі, вбудований периферійний пристрій на основі ESP32 і систему збору даних.

У [11] аналізується можливість використання мікроконтролеру ESP32 із вбудованою камерою для завдань класифікації зображень за допомогою згорткової нейронної мережі. Виконано обчислювальні експерименти з різною тривалістю фотозйомки та подальшої обробки зображень. Розгорнуто згортову нейронну мережу, попередньо навчену на іншому пристрої, із застосуванням архітектури MobileNet на мікроконтролері. Продемонстровано, що потужності ESP32 достатньо для одночасної роботи як камери, так і згорткової нейронної мережі.

Отже, з аналізу літератури можна зробити висновок, про перспективність розробки узагальнених підходів до проектування та імплементації архітектур IoT систем. Актуальним напрямом є врахування в таких архітектурах особливостей умов експлуатації та специфічних сценаріїв роботи IoT систем.

Методи. Особливості побудови архітектури IoT пристроїв та відповідного програмного забезпечення розглянуто на прикладі системи автоматичного керування світлом.

Для розробки тестового проєкту використано пристрої, які є загальноживими для IoT, а отже, не вимагають специфічних налаштувань.



Передбачено можливість задавати різні сценарії керування світлом. Система повинна бути стійкою до можливих відключень електроенергії.

Для реалізації цього функціоналу застосовано такі пристрої: плата розробника ESP-WROOM-32; електромеханічне реле SRD-5VDC-SL-C управління 5В навантаження 250В 10А; світлодіодна лампа 220 В; детектор напруги з оптопарою, пристрій має оптогальванічну розв'язку, це дає можливість підключати модуль безпосередньо до виводу мікроконтролера. За наявності змінної напруги на вході, вихід OUT матиме логічний нуль; блок живлення AC 220V to DC 5V 700mA; модуль зарядки TP4056, який підтримує вхідні роз'єми Type-C та MicroUSB для заряджання Li-ion акумуляторів; MT3608 підвищуючий імпульсний перетворювач напруги; два діоди Шоттки SS14; діод 1N4007S; акумулятор Videx LI-ION 2200 mAh; конденсатор 22000мкФ 16В.

Одна з особливостей модуля ESP32 полягає в тому, що він може не тільки підключатися до існуючої Wi-Fi мережі та працювати як веб-сервер, але також може встановлювати власну мережу, дозволяючи іншим пристроям підключатися безпосередньо до нього та отримувати доступ. Отже, ESP32 може працювати в трьох різних режимах: режим станції, режим точки доступу та обидва перші режими одночасно.

Рисунок 1 відображає електричну схему пристроїв, які використовуються для віддаленого управління світлом.

До платформи підключено 4 реле до пінів гріо 25, гріо 26, гріо 27, гріо 14. Відповідно гріо 34, гріо 35, гріо 32, гріо 33 пини до яких підключено детектор напруги. Пін гріо 39 за допомогою якого перевіряється наявність електроенергії (напруга 220).

Забезпечення безперебійної роботи систем IoT під час відключень електроенергії надзвичайно важливо, оскільки ці системи часто виконують завдання, від яких залежить безпека та стабільність процесів прийняття рішень. У промислових умовах, де системи інтернету речей контролюють виробниче обладнання, втрата зв'язку або даних під час відключення електроенергії може призвести до фінансових втрат і навіть небезпечних ситуацій. Тому важливо забезпечити резервне живлення або інші засоби підтримки функціональності IoT, щоб система могла продовжувати зберігати дані та функціонувати за будь-яких умов. Отже, зменшуючи ризик і запобігаючи можливим наслідкам аварій.

Для збереження параметрів при відключенні електроенергії доступна можливість перемикання між зовнішнім живленням та акумулятором для живлення плати ESP-WROOM-32. На рисунку 2 наведена схема, яка дозволяє здійснювати перехід

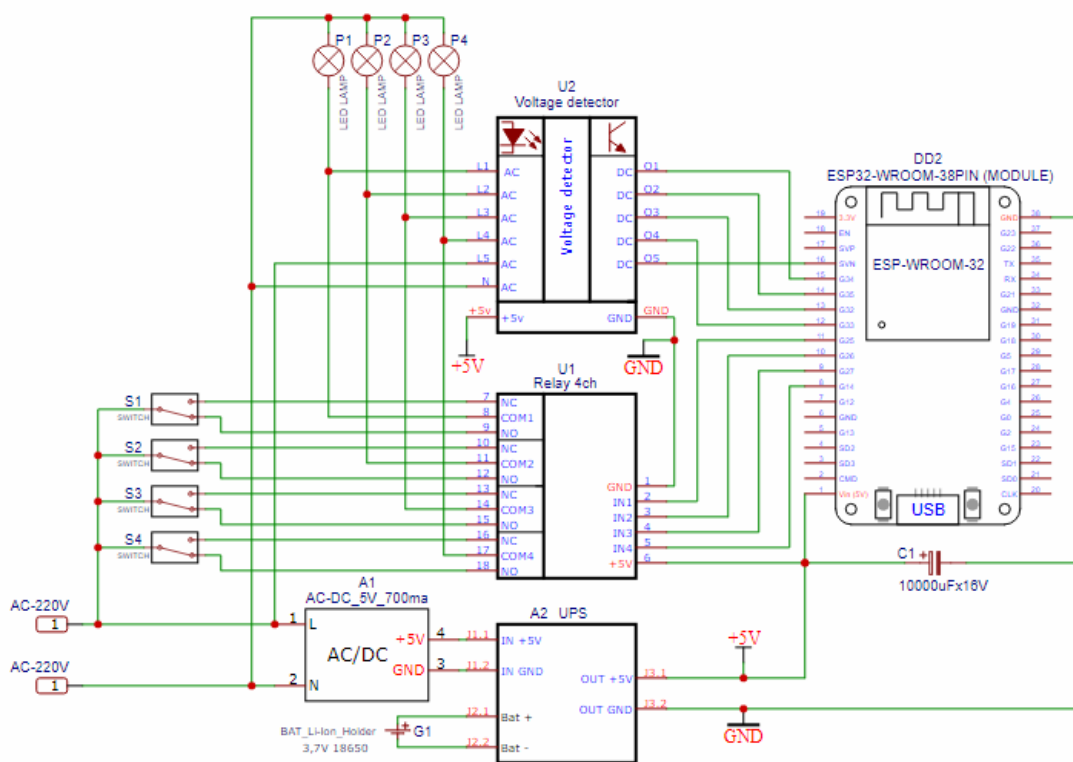


Рис. 1. Електрична схема пристрою керування

від зовнішнього живлення до живлення від акумулятора, а також контролювати стан акумулятора.

Наведені на рисунках 1, 2 принципові схеми функціонування IoT системи керування світлом повинні доповнюватись відповідним програмним забезпеченням.

Результати. Розглянемо деякі особливості сценаріїв керування обладнанням тестового проєкту.

Більшість сценаріїв використовують бібліотеку WiFi.h. Ця бібліотека надає спеціальні методи ESP для роботи з Wi-Fi, які викликаються для підключення до мережі. Після цього підключається бібліотека WebServer.h, в якій є кілька методів, які використовуються для налаштування серверу і обробки вхідних HTTP запитів, без необхідності реалізовувати низькорівневі деталі підключення та передачі даних.

Для збереження параметрів при відключенні електроенергії використовується EEPROM – область пам'яті на мікроконтролері ESP32. Використання змінної EEPROM\_SIZE визначає обсяг доступної пам'яті для зберігання даних в EEPROM.

```
#include "WiFi.h"
#include <WebServer.h>
#include <EEPROM.h>
```

```
#define EEPROM_SIZE 512 // розмір EEPROM
// для ESP32
```

В даному випадку мікроконтролер ESP32 налаштовується в режимі станції та точки доступу,

отже безпека з'єднання забезпечується SSID мережі та паролем.

```
String _ssid = ""; // для зберігання SSID
String _password = ""; // для зберігання пароля
// мережі
String _ssidAP = ""; // SSID AP точки доступу
String _passwordAP = ""; // пароль точки
// доступу
```

```
IPAddress apIP(192, 168, 4, 1);
```

Після цього оголошується об'єкт бібліотеки WebServer. Конструктор цього об'єкта як параметр приймає номер порту (який сервер прослуховуватиме).

```
WebServer HTTP(80);
```

Далі оголошуються виводи GPIO плати NodeMCU, до яких підключені реле, детектори напруги та їх початковий стан.

```
const int relayPins[] = {25, 26, 27, 14}; // піни, до
// яких підключено реле
const int numRelays = sizeof(relayPins) /
// sizeof(relayPins[0]);
int relayStates[]={ HIGH, HIGH, HIGH,
// HIGH}; // стан реле вимкнено
int Voltage_Sensor[]={LOW,LOW,LOW,LOW}; //
// детектор напруги
int Voltage_Sensor_Pin[]={34,35,32,33}; // піни,
// до яких підключено детектор напруги
```

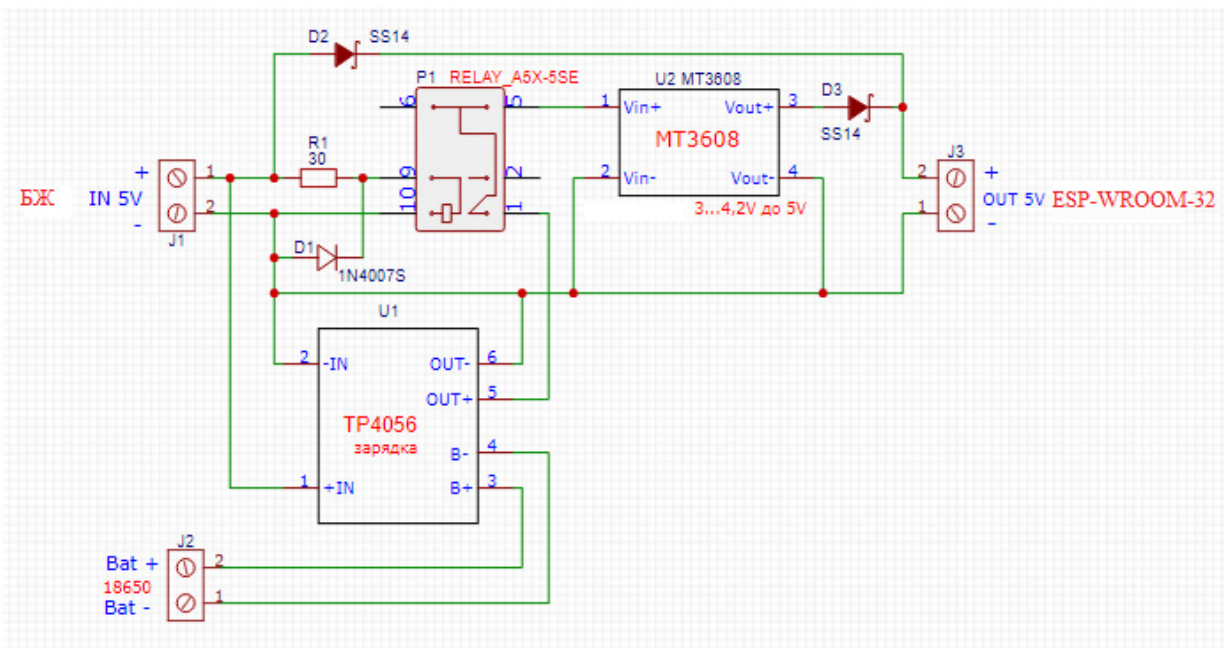


Рис. 2. Схема джерела безперебійного живлення

```
int Light_Pin=39; // пін за допомогою якого
перевіряємо наявність світла (напруга) 05 - 2
void loadArraysFromEEPROM(); // завантаження
параметрів з EEPROM
String webString=""; // текст для надсилання
```

Перед запуском функції setup() налаштовується сервер HTTP. Насамперед, для налагодження відкривається послідовне з'єднання та встановлюються порти GPIO.

```
Serial.begin(115200);
pinMode(Light_Pin, INPUT);
loadArraysFromEEPROM(); // завантаження
параметрів з EEPROM
// готуємо GPI для реле
for (int i = 0; i < numRelays; i++) {
  pinMode(Voltage_Sensor_Pin[i], INPUT); //
налаштовує цей контакт на вхід
  digitalWrite(Voltage_Sensor_Pin[i], Voltage_
Sensor[i]); }
for (int i = 0; i < numRelays; i++) {
  pinMode(relayPins[i], OUTPUT);
  digitalWrite(relayPins[i], relayStates[i]); }
```

Щоб обробити реальні вхідні запити HTTP в функції loop(), викликається метод handleClient() об'єкта HTTP. Також згідно з запитом змінюється стан реле та перевіряється за допомогою датчика наявність напруги.

```
void loop() {
  HTTP.handleClient();
  if (digitalRead(Light_Pin) == 0) // якщо світло
  є
  {
    for (int i = 0; i < numRelays; i++) {
      relayStates[i]=digitalRead(relayPins[i]);
      digitalWrite(relayPins[i], relayStates[i]); }
    for (int i = 0; i < numRelays; i++) {
      Voltage_Sensor[i] = digitalRead(Voltage_
Sensor_Pin[i]);
      //перевіряємо за допомогою датчика наяв-
ність напруги
      digitalWrite(Voltage_Sensor_Pin[i], Voltage_
Sensor[i]); }
    }
  else
  {
    // якщо світла немає
    saveArraysToEEPROM();
  }
}
```

Щоб відповісти на запит HTTP, використовується метод send(). Хоча цей метод можна викликати з іншим набором аргументів, його найпро-

стіша форма складається з коду HTTP відповіді, типу контенту і самого контенту.

Далі створюються вісім функцій для обробки запитів на включення (виключення) реле.

```
void rel1_on0() {
  digitalWrite(relayPins[0], LOW);
  HTTP.send(200, "text/html", "gpio"+String((int)
relayPins[0])+" on");
  // увімкнути освітлення 1 житлової кімнати
}
void rel1_off0() {
  digitalWrite(relayPins[0], HIGH);
  HTTP.send(200, "text/html", "gpio"+String((int)
relayPins[0])+" off"); // вимкнути освітлення 1
житлової кімнати
}
```

Функція baza() просто поєднує у великий рядок стан реле та наявність напруги і повертає її у функцію HTTP.send().

При відсутності електроенергії розроблено функції які надають можливість зберігати та відновлювати параметри освітлення в EEPROM - область пам'яті на мікроконтролері ESP32.

```
// Функція збереження параметрів освітлення
при вимкненні світла EEPROM
void saveArraysToEEPROM() {
  EEPROM.begin(EEPROM_SIZE);
  // Зберігаємо значення стану реле
  for (int i = 0; i < sizeof(relayStates) /
sizeof(relayStates[0]); i++) {
    EEPROM.put(i * sizeof(relayStates[0]),
relayStates[i]); }
  // Зберігаємо значення детектора напруги
  int startIndex = sizeof(relayStates);
  for (int i = 0; i < sizeof(Voltage_Sensor) /
sizeof(Voltage_Sensor[0]); i++) {
    EEPROM.put(startIndex + i * sizeof(Voltage_
Sensor[0]), Voltage_Sensor[i]); }
  EEPROM.commit(); // Зберігаємо зміни
  EEPROM.end(); }
```

```
// Функція для завантаження параметрів з
EEPROM
void loadArraysFromEEPROM() {
  EEPROM.begin(EEPROM_SIZE);
  // Завантажуємо значення стану реле
  for (int i = 0; i < sizeof(relayStates) /
sizeof(relayStates[0]); i++) {
    EEPROM.get(i * sizeof(relayStates[0]),
relayStates[i]); }
  // Завантажуємо значення детектора напруги
  int startIndex = sizeof(relayStates);
  for (int i = 0; i < sizeof(Voltage_Sensor) /
sizeof(Voltage_Sensor[0]); i++) {
    EEPROM.get(startIndex + i * sizeof(Voltage_
Sensor[0]), Voltage_Sensor[i]); }
  EEPROM.end(); }
```

Дослідимо алгоритм виявлення стану освітлення на прикладі однієї світлодіодної лампи.

Коли світло вимкнене:

– Реле знаходиться у вимкненому стані (логічна 1), а детектор напруги сигналізує логічну 1, що вказує на відсутність змінної напруги на лампі. Для ввімкнення світла необхідно надіслати GET-запит із командою /pinon для активації реле. У результаті реле переходить у ввімкнений стан (логічний 0), і детектор напруги також фіксує логічний 0.

– Реле перебуває у вимкненому стані (логічний 0), тоді як детектор напруги показує логічну 1 (лампа вимкнена через прохідний вимикач). Щоб увімкнути світло зі смартфона, потрібно надіслати GET-запит із командою /pinoff для вимкнення реле. У результаті реле переходить у стан вимкнення (логічна 1), а детектор напруги фіксує логічний 0 (світло ввімкнено).

Коли світло ввімкнене:

– Реле перебуває у ввімкненому стані (логічний 0), а детектор напруги фіксує логічний 0,

що свідчить про наявність змінної напруги на лампі. Щоб вимкнути світло, необхідно надіслати GET-запит із командою /pinoff для відключення реле. У результаті реле переходить у вимкнений стан (логічна 1), а детектор напруги починає повертати логічну 1.

– Реле перебуває у стані вимкнення (логічна 1), тоді як детектор напруги сигналізує логічний 0, що вказує на ввімкнене світло через прохідний вимикач. Для вимкнення світла за допомогою смартфона необхідно надіслати GET-запит із командою /pinon для активації реле. У результаті реле переходить у ввімкнений стан (логічний 0), а детектор напруги починає повертати логічну 1, що свідчить про вимкнення світла.

**Висновки.** Розглянуто процес проектування апаратної частини та програмної реалізації системи IoT на прикладі пристрою автоматичного керування світлом. Запропоновано ефективну архітектуру з точки зору стійкості системи при відключеннях електроенергії.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Espressif Systems. ESP32. Available online: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32> (accessed on 09 November 2024).
2. Domínguez-Bolaño T., Campos O., Barral V., Escudero C.J., García-Naya J.A. An overview of IoT architectures, technologies, and existing open-source projects. *Internet of Things Volume 20*, November 2022, 100626. URL: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100626>.
3. Lombardi M., Pascale F., Santaniello D. *Internet of Things: A General Overview between Architectures, Protocols and Applications*. Information 2021, 12, 87. URL: <https://doi.org/10.3390/info12020087>.
4. Kumar A., Sharma S., Singh A., Alwadain A., Choi B.-J., Manual-Brenosa J., Ortega-Mansilla A., Goyal N. Revolutionary Strategies Analysis and Proposed System for Future Infrastructure in Internet of Things. *Sustainability*. 2022; 14(1):71. URL: <https://doi.org/10.3390/su14010071>.
5. Goyal P., Sahoo A.K., Sharma T.K. *Internet of things: Architecture and enabling technologies*. *Materials Today: Proceedings*, 34, 3, 2021, pp. 719–735. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.678>.
6. Nikoui T.S., Rahmani A.M., Balador A. Javadi H.H.S. *Internet of things architecture challenges: A systematic review*. *International Journal of Communication Systems*, vol. 34, no. 4, pp. E4678, 2021. URL: <https://doi.org/10.1002/dac.4678>.
7. Marshoodulla S.Z., Saha G. A survey of data mining methodologies in the environment of IoT and its variants, *Journal of Network and Computer Applications*, 228, (103907), (2024). URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2024.103907>.
8. Hercog D, Lerher T, Truntič M, Težak O. Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices. *Sensors*. 2023, 23(15):6739. URL: <https://doi.org/10.3390/s23156739>.
9. Ramadhani R.R., Yuliana M., Pratiarso A. Smart Room Lighting System for Energy Efficiency in Indoor Environment. *International Journal of Artificial Intelligence & Robotics (IJAIR)*. 2022, 4(2), 48–58. URL: <https://doi.org/10.25139/ijair.v4i2.5266>.
10. Espinosa-Gavira M.J., Agüera-Pérez A., Palomares-Salas J.C., Sierra-Fernandez J.M., Remigio-Carmona P., González de-la-Rosa J.J. Characterization and Performance Evaluation of ESP32 for Real-time Synchronized Sensor Networks, *Procedia Computer Science*, Volume 237, 2024, Pages 261-268, ISSN 1877-0509. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.05.104>.
11. Sineglazov V., Khotsyanovsky V. Camera Image Processing on ESP32 Microcontroller with Help of Convolutional Neural Network. *Automation and computer-integrated technologies*, 2022, Vol. 2, No. 72. URL: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.72.16939>.

## REFERENCES

1. Espressif Systems. ESP32. Available online: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32> (accessed on 09 November 2024).

2. Domínguez-Bolaño T., Campos O., Barral V., Escudero C.J., García-Naya J.A. (2022). An overview of IoT architectures, technologies, and existing open-source projects. *Internet of Things* Volume 20, 100626. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100626>
3. Lombardi M., Pascale F., Santaniello D. (2021). Internet of Things: A General Overview between Architectures, Protocols and Applications. *Information*. 12, 87. <https://doi.org/10.3390/info12020087>
4. Kumar A., Sharma S., Singh A., Alwadain A., Choi B.-J., Manual-Brenosa J., Ortega-Mansilla A., Goyal N. (2022). Revolutionary Strategies Analysis and Proposed System for Future Infrastructure in Internet of Things. *Sustainability*. 14(1):71. <https://doi.org/10.3390/su14010071>
5. Goyal P., Sahoo A.K., Sharma T.K. (2021). Internet of things: Architecture and enabling technologies. *Materials Today: Proceedings*, 34, 3, pp. 719-735. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.678>
6. Nikoui T.S., Rahmani A.M., Balador A. Javadi H.H.S. (2021). Internet of things architecture challenges: A systematic review. *International Journal of Communication Systems*, vol. 34, no. 4, pp. E4678. <https://doi.org/10.1002/dac.4678>
7. Marshoodulla S.Z., Saha G. (2024). A survey of data mining methodologies in the environment of IoT and its variants, *Journal of Network and Computer Applications*, 228, (103907). <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2024.103907>
8. Hercog D, Lerher T, Truntič M, Težak O. (2023). Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices. *Sensors*. 23(15):6739. <https://doi.org/10.3390/s23156739>
9. Ramadhani R.R., Yuliana M., Pratiarso A. (2022). Smart Room Lighting System for Energy Efficiency in Indoor Environment. *International Journal of Artificial Intelligence & Robotics (IJAIR)*. 4(2), 48-58. <https://doi.org/10.25139/ijair.v4i2.5266>
10. Espinosa-Gavira M.J., Agüera-Pérez A., Palomares-Salas J.C., Sierra-Fernandez J.M., Remigio-Carmona P., González de-la-Rosa J.J. (2024). Characterization and Performance Evaluation of ESP32 for Real-time Synchronized Sensor Networks, *Procedia Computer Science*, Volume 237, Pages 261-268, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.05.104>.
11. Sineglazov V., Khotsyanovsky V. (2022). Camera Image Processing on ESP32 Microcontroller with Help of Convolutional Neural Network. *Automation and computer-integrated technologies*. Vol. 2, No. 72. <https://doi.org/10.18372/1990-5548.72.16939>

## PROBLEMS OF MACHINE LEARNING IMPLEMENTATION ON MODERN EDGE DEVICES

**Melnychuk O. S.**

*Postgraduate Student at the Department of CDS  
Lviv Polytechnic National University  
Stepana Bandery str., 12, Lviv, Ukraine  
[orcid.org/0009-0008-2385-1488](https://orcid.org/0009-0008-2385-1488)  
[oleksandr.s.melnychuk@lpnu.ua](mailto:oleksandr.s.melnychuk@lpnu.ua)*

**Lobur M. V.**

*Ph.D. Hab., Professor at the Department of CDS  
Lviv Polytechnic National University  
Stepana Bandery str., 12, Lviv, Ukraine  
[orcid.org/0000-0001-7516-1093](https://orcid.org/0000-0001-7516-1093)  
[mykhaylo.v.lobur@lpnu.ua](mailto:mykhaylo.v.lobur@lpnu.ua)*

**Sviridova T. V.**

*Ph.D, Director of Engineering  
Epam Systems  
Uhorska str., 14, Lviv, Ukraine  
[orcid.org/0009-0008-4332-8109](https://orcid.org/0009-0008-4332-8109)  
[tetyana\\_sviridova@epam.com](mailto:tetyana_sviridova@epam.com)*

**Key words:** *TinyML, embedded AI, edge computing, Internet of Things, microcontrollers.*

Recently, artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) have attracted considerable attention in both industry and academia. Since traditional ML methods are energy-demanding, they can be applied only to a limited subset of devices with significant computing capabilities. However, the rise in complexity of available processors and microcontrollers made it possible to integrate ML methods into data pipelines on mobile devices, and later – on low-power (few milliwatts) edge devices. This concept finally took shape in 2018 and was named TinyML. Its rapid spread is fueled by the huge number of manufactured microcontrollers (250 billion) and the popularity of the Internet of Things (IoT). In the future, TinyML can be used on every device that is part of the IoT, although this will not always be economically justified.

At the same time, the application of TinyML technologies is not straightforward and requires a careful assessment of the capabilities as well as selection of both the ML algorithm and the peripheral device. This is explained primarily by the lack of generally accepted benchmarks of both TinyML algorithms and hardware capabilities for the application of ML. There are several approaches to TinyML implementation: software-oriented, hardware-oriented, and hybrid. Depending on the approach, different methods of solving a specific problem are used. Some ML algorithms can be adopted to edge devices through the use of simplification and adaptation techniques tailored for neural networks (NN). However, the process is not automated and generalized as of now.

This article is devoted to an overview of the concept of TinyML, its main stages and features, the most prominent achievements in the fields of speech and image recognition, sequence classification and data compression, health diagnostics and brain interaction, prediction of equipment malfunctions and anomaly detection, autonomous transport and ecology. Unfortunately, the volume of the article does not allow us to reveal the specifics of TinyML's application in other fields and with more details. In addition, the article analyzes the problems that arise during ML implementation on low-power devices. The purpose of the article is to become a short guide and roadmap to the world of TinyML applications.

## ПРОБЛЕМИ ВПРОВАДЖЕННЯ МАШИННОГО НАВЧАННЯ В СУЧАСНІ ПЕРИФЕРІЙНІ ПРИСТРОЇ

**Мельничук О. С.**

*аспірант кафедри САП*

*Національний університет «Львівська політехніка»*

*вул. Степана Бандери, 12, Львів, Україна*

*orcid.org/0009-0008-2385-1488*

*oleksandr.s.melnichuk@lpnu.ua*

**Лобур М. В.**

*доктор технічних наук, професор кафедри САП*

*Національний університет «Львівська політехніка»*

*вул. Степана Бандери, 12, Львів, Україна*

*orcid.org/0000-0001-7516-1093*

*mykhaylo.v.lobur@lpnu.ua*

**Свірідова Т. В.**

*кандидат технічних наук, директор з інженерії*

*ЕПАМ Системз*

*вул. Угорська, 14, Львів, Україна*

*orcid.org/0009-0008-4332-8109*

*tetyana\_sviridova@epam.com*

**Ключові слова:** *TinyML, вбудований ШІ, периферійні обчислення, інтернет речей, мікроконтролери.*

Останнім часом штучний інтелект (ШІ) та машинне навчання (МН) привернули значну увагу як на виробництві, так і в академічних колах. Оскільки традиційні методи МН є енергоємними, то це обмежує їх застосування підмножиною пристроїв зі значними обчислювальними можливостями. Однак зростання потужності процесорів та мікроконтролерів дозволило інтегрувати методи МН для обробки даних спершу на мобільні пристрої, а пізніше – на малопотужні (кілька міліват) периферійні пристрої. Ця концепція остаточно сформувалась у 2018 році та отримала назву TinyML. Її стрімке поширення підживлюється велетенською кількістю вироблених мікроконтролерів (250 мільярдів) та популярністю інтернету речей (ІР). У перспективі, TinyML може бути використаний на кожному пристрої що є частиною ІР, хоча це не завжди буде економічно виправдано.

Водночас застосування технологій TinyML не є простим і потребує ретельної оцінки та вибору можливостей як алгоритму МН так і периферійного пристрою. Це пояснюється насамперед відсутністю загальноприйнятих способів порівняння як алгоритмів TinyML, так і спроможностей апаратного забезпечення щодо застосування МН. Існує кілька підходів до впровадження TinyML: орієнтований на програмне забезпечення, апаратне забезпечення та гібридний. Залежно від підходу застосовуються різні методи вирішення конкретної задачі. Деякі алгоритми МН можуть бути перенесені на периферійні пристрої досить просто, через застосування прийомів спрощення та адаптації нейронних мереж (НМ). Однак на сьогодні їх застосування не є автоматизованим та узагальненим.

Ця стаття присвячена огляду концепції TinyML, основних етапів та особливостей її застосування, найбільш помітних досягнень в галузях розпізнавання мови та зображень, класифікації послідовностей та стиснення даних, діагностики здоров'я та взаємодії з мозком, прогнозування несправностей техніки та виявлення аномалій, автономного транспорту та екології. На жаль, об'єм статті не дозволяє розкрити особливості застосування TinyML в решті галузей та більш детально. Крім того, в статті проаналізовані проблеми, які виникають при впровадженні технологій МН на малопотужних пристроях. Мета статті – стати путівником та дороговказом у світ застосувань TinyML.

**Introduction.** TinyML plays a pivotal role in the Industry 4.0 [1] and Industry 5.0 [2] revolutions, facilitating the integration of AI-powered computing technologies across various sectors, including smart cities, the automotive industry, and medical robotics. Over the last several decades, considerable effort has been put into advancing Machine Learning (ML) from cloud premises to mobile devices and further to the edge nodes [3]. Specifically, low-power (under a milliwatt) embedded devices based on Micro-Controller Units (MCUs) have garnered significant attention. Each of these “tiny” devices doesn’t exceed few hundred Kilobytes in memory, and several Megabytes of flash storage where ML models can be stored and operated. But there are more than 250 billion MCUs in use already and the number grows every year [3]. This is largely due to their minimal power consumption and low cost, along with their versatility and reliability. By integrating with sensors, these systems gain the ability to perceive their surroundings; connecting to actuators, they can perform various actions, and through interconnectivity, they enable the spread of distributed intelligence. Embedded technologies form the backbone of the Internet of Things (IoT) ecosystem and its myriad smart applications: from smart buildings and cities to smart metering, agriculture, environmental monitoring, health, logistics, and retail. The progression into the Industrial Internet of Things (IIoT) has further enhanced the capacity for intelligent, real-time processing of vast data volumes, leading to innovations in autonomous vehicles, smart manufacturing, anomaly detection, and predictive maintenance.

The essence of intelligence in embedded technologies lies in the learning algorithms that empower devices to make informed decisions from the data they collect. However, implementing Machine Learning (ML) on tiny devices poses significant challenges due to stringent architectural, power, and latency constraints. These devices operate at milliwatt power levels nevertheless are expected to deliver real-time responses, especially in critical systems such as healthcare monitors, autonomous vehicles, or industrial human-robot collaboration. In these scenarios, any delay in decision-making can result in dire outcomes, including jeopardized patient safety, increased road hazards, or industrial operation interruptions.

**Methods.** The aim of the article is to serve as a guide for the latest research directions and approaches on TinyML. The objective is to gain a better understanding of the state of the art of TinyML especially in perspective of edge AI. This study seeks the newest trends and most prominent challenges in the field. For the purpose, a search on web-based resources was conducted using relevant keywords. The authors then checked the articles manually excluding any study out of scope.

**Problem Statement.** Since 2018, the concept of Tiny Machine Learning (TinyML) has emerged with a widely acknowledged definition: TinyML is a paradigm that facilitates running ML on the edge devices with minimal processor and memory requirements; hence, the power consumption of such systems is expected to be within a few milliwatts or less [4]. The hurdles facing TinyML developers are significant, particularly because modern neural networks, among the most advanced technologies today, require billions of parameters [5]. These larger networks yield better performance and broader applicability but at the cost of energy consumption is increased with network size. This escalating demand for energy makes the expansion of neural networks unsustainable at larger scales, underscoring TinyML as not just an attractive but a necessary area of research. Market trends underscore this shift, showing a preference for deploying less energy-intensive hardware and simplifying the complexity of learning algorithms, emphasizing the need for TinyML solutions to become even more efficient.

In developing TinyML solutions, practitioners typically follow one of two traditional approaches — ML-oriented (also known as SW-oriented) or HW-oriented — or a newer strategy known as co-design[6]. Traditional methods keep the design of the ML framework and its hardware implementation separate. In the ML-oriented approach, specialists design, train, and test a model appropriate for the application, optimize its parameters, and deploy it on a chosen device. Conversely, the HW-oriented strategy begins without a predetermined hardware platform, focusing instead on creating optimized hardware using scaled-down models and techniques. The co-design method is innovative because it involves ML experts and hardware engineers collaborating from the very beginning. They share their expertise to design a solution, with hardware engineers delving into the mathematical foundations of ML algorithms to identify efficient hardware components, and ML researchers exploring the latest technologies to possibly reconfigure their algorithms for a seamless hardware-software integration. This mutual shaping of form and function represents the cutting-edge of TinyML development [7].

**Data pipeline.** The standard procedure for implementing TinyML, as illustrated in a conceptual figure, involves three key stages: training, optimization, and deployment. This process can be split into two main components: conventional ML tasks (such as data collection, algorithm selection, model training, and optimization) and tasks specific to TinyML (like model porting and deployment).

The initial step in TinyML development involves choosing an appropriate algorithm and collecting data, either from pre-existing datasets or real-time sensor



data. For example, the Google Speech Commands dataset can be utilized to develop and test a keyword spotting algorithm, but also possible way is to utilize sensor data to train a computer vision algorithm for autonomous micro-cars. Training typically occurs on a high-resource device, such as a server or PC, using popular ML frameworks like TensorFlow, PyTorch, or Scikit-Learn.

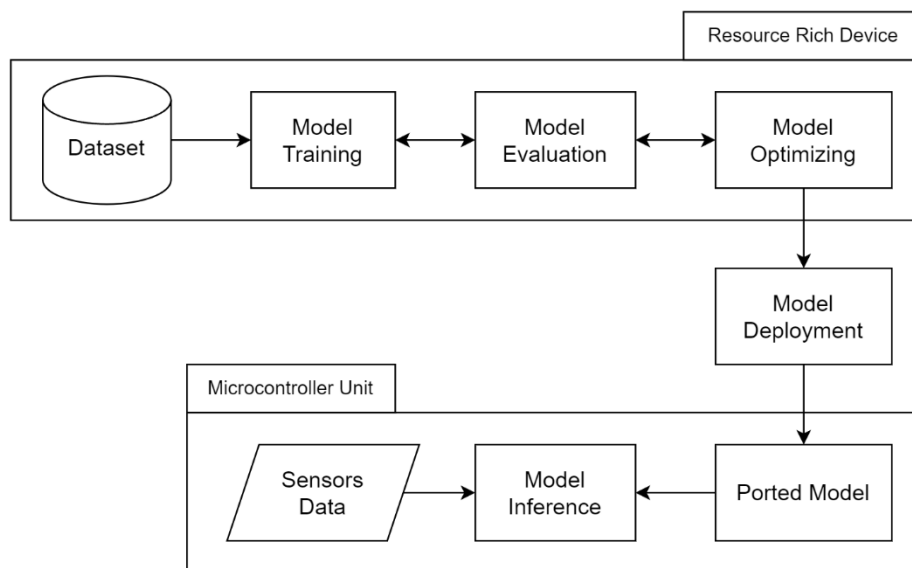
After training, the model undergoes optimization through methods such as Pruning, Knowledge Distillation, Quantization, and Encoding to meet specific performance criteria. Pruning removes unnecessary neural network parameters; Knowledge Distillation involves teaching a smaller model to replicate the output of a larger, pre-trained one; and Quantization reduces the numerical precision of the network to make it more efficient, though care must be taken to avoid significant performance drops.

The final stages involve porting the optimized model to a language compatible with MCUs (commonly C/C++), using tools like TensorFlow Lite Micro to translate the model into a format suitable for embedded systems. This step prepares the model for deployment in an MCU, where it can perform inference tasks directly on sensor data, leveraging the machine learning model embedded within [8].

**Deployments.** The growing popularity of embedded technologies has spurred ongoing research into low-resource technologies, aligning with the objectives of TinyML. A vital aspect of TinyML applications involves embedded inference mechanisms, which have seen a significant amount of research. It is important to highlight that models developed using mainstream ML frameworks like TensorFlow, PyTorch, and Scikit-Learn are typically not directly compatible with

TinyML due to their substantial memory demands. To address this, various runtimes have been introduced to facilitate ML/DL implementation on microcontroller units (MCUs). Yet, there are essentially three main strategies identified for deploying TinyML solutions: Manual Programming, Code Generators, and ML Interpreters [9].

Manual Programming is often considered the most effective approach because it allows for detailed customization and optimization. However, this method's drawback is that optimizations are usually proprietary and not widely shared, limiting knowledge dissemination. Additionally, the diverse nature of MCUs complicates the standardization of Embedded ML techniques. While Manual Programming can enhance performance, it sacrifices ease of replication and requires significant time investment, making it less suitable for individuals outside the field, such as hobbyists. The absence of tools for on-the-fly model updates further positions manual programming as a necessary, albeit challenging, option. On the other hand, Code Generation tools stand out for their convenience, offering a way to achieve optimal solutions without the need for manual coding. This approach significantly simplifies the deployment process, making it more accessible to a broader audience. Code Generation tools offer a convenient and efficient pathway to achieving optimal TinyML solutions without the necessity for manual programming. Tools like EdgeImpulse and Imagimob leverage AutoML can provide comprehensive Software-as-a-Service (SaaS) solutions, while others serve as repositories for locating third-party TinyML libraries. Despite their advantages, a significant limitation of Code Generation approaches is the



**Fig. 1. Generic TinyML Pipeline**

fragmented market. Many vendors use proprietary toolsets and compilers, leading to challenges with interoperability and portability across different platforms.

Interpreters present a contrasting advantage by ensuring superior portability, as their architecture remains consistent across various devices. This uniformity allows for the easy porting of ML/DL models without tying the model's architecture to a specific framework. Models can also be individually tailored and optimized to meet the specific requirements of different devices. However, this approach may incur slight performance and memory usage overheads. The distinction between the model and system-level processes under this scheme enhances generalizability and simplifies the introduction of benchmarks, facilitating a broader application of embedded machine learning.

To make embedded machine learning more universally accessible, leading technology companies have initiated open-source projects aimed at standardizing TinyML approaches. Google's TensorFlow Lite Micro (TFLM) and Microsoft's Embedded Learning Library (ELL) are prime examples of such efforts.

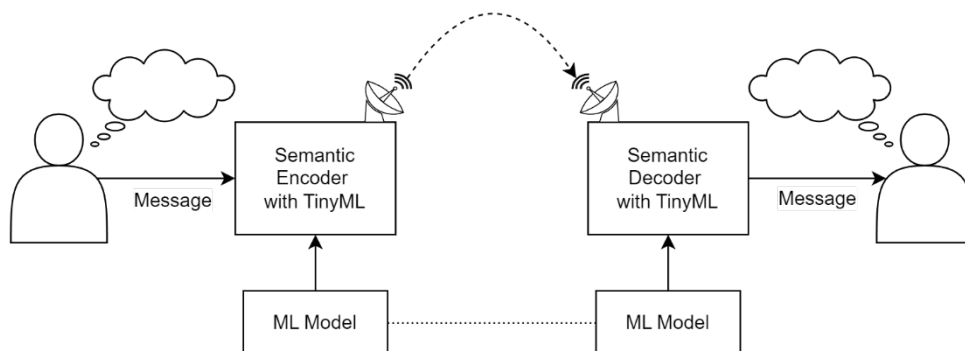
**TinyML Applications Overview.** There are many applications of TinyML, including speech and vision-based applications, data pattern classification and compression, health diagnosis, brain-control interface, autonomous vehicles, phenomics, and ecology monitoring. This section details the state-of-art applications of TinyML using various advanced technologies.

**Speech-Based Applications.** Key applications in today's context include speech detection and recognition, online education platforms, and purpose-driven communication, as illustrated in Figure 2. These applications typically demand substantial data processing and power consumption on the host device. To address these challenges, the TinySpeech library has been developed, offering a solution that minimizes computational demands and storage

requirements through the use of deep convolutional networks.

In the context of Speech Enhancement, the researchers tackled the challenge of optimizing the size of the speech enhancement model due to limitations in hardware resources. The study utilized structured pruning and integer quantization techniques on a Recurrent Neural Network (RNN) model dedicated to speech enhancement. Their findings indicated a significant reduction in the model's size by approximately 11.9 times and a decrease in the number of operations by about 2.9 times. Additionally, the research highlighted the effectiveness of neural speech enhancement methods in hearing aid devices, notably improving battery performance. The necessity for efficient resource use in energy-restricted edge devices running voice recognition tasks was further emphasized by the findings presented in another study. This research proposed a strategy for splitting the process and suggested a co-design approach tailored for TinyML-based voice recognition systems. By implementing a windowing operation, the researchers managed to segregate hardware and software tasks, enabling preliminary voice data processing [10]. This approach led to reduced energy consumption on the hardware side. Furthermore, the study laid out the groundwork for future research on optimizing the division between hardware and software through co-design, aiming to enhance efficiency even further.

**Vision-Based Applications.** TinyML is pivotal for processing computer vision datasets, especially when such tasks need to be executed on edge devices for swift outcomes. A study highlighted in [11] tackled the hurdles of training models on the OpenMV H7 microcontroller board. The researchers developed a system capable of identifying American Sign Language alphabets using an ARM Cortex-M7 microcontroller, equipped with just 496 KB of frame-buffer RAM. This effort primarily aimed at overcoming the significant issue of high generalization errors observed in convolutional neural networks (CNNs),



**Fig. 2. Voice recognition**

which, despite high training and testing accuracy, struggled to effectively adapt to new scenarios and backgrounds with noise interference. The team applied interpolation augmentation to address this, achieving a notable 98.80% accuracy in testing and 74.59% in generalization. This approach notably mitigated the accuracy loss typically associated with quantization in hand sign classification tasks.

In a study detailed in [12], researchers conducted a case study to create a gesture recognition device that could attach to a cane for use by visually impaired individuals. The primary design considerations included affordability, precise gesture recognition, and efficient battery usage. Data for this project was gathered from a gesture dataset, and the ProtoNN model was employed alongside a classification algorithm for training purposes. The study underscored the importance of comprehensively understanding gestures and their safety implications, as well as exploring potential integration with Android and other devices as areas for future investigation.

#### **Data Pattern Classification and Compression.**

The adaptation of TinyML models to process real-time data has become a focal point for researchers. In [13], a pioneering approach was introduced, named TinyML with Online Learning (TinyOL), which facilitates the incremental online training of models on microcontroller units (MCUs) and allows for the models to be updated directly on IoT edge devices. This system was developed in C++, incorporating an extra layer into TinyOL. The methodology was applied to the auto-encoder on the Arduino Nano 33 BLE Sense board, training the model to recognize new data patterns. The research highlighted the need for creating efficient and optimized neural network algorithms that can accommodate online training on devices. Meanwhile, [14] addressed the challenge posed by the number of activation layers in memory-restricted AI devices on the edge. To tackle this, Tiny-Transfer-Learning (TinyTL) was devised to make better use of memory on edge devices by bypassing the use of intermediate layers for activation.

**Health Diagnosis.** In response to the COVID-19 pandemic, there's an increased necessity for continuous monitoring of cough-related respiratory symptoms. Researchers introduced a scalable CNN-based model called Tiny RespNet in [15], designed to function in multi-modal environments. This model is implemented on the Xilinx Artix-7 100T FPGA, offering the advantages of parallel processing, low power usage, and high energy efficiency. The Tiny RespNet framework is capable of processing various types of input, including audio recordings and speech from patients, as well as demographic information, facilitating effective classification. It successfully classifies cough detection and related respiratory symptoms across three datasets.

**Predictive Maintenance.** Of special importance for industry applications is the ability of TinyML solutions to predict when maintenance should be performed for machines of various nature. A study [16] introduces a self-contained low-power on-device PdM (LOPdM) system based on the cutting-edge self-powered sensor (SPS) and tiny machine learning (TinyML) techniques. The piezoelectric sensor measures vibration of simulated equipment. Result data forms input for six different AI models. Two of the models, namely the random forest (RF) and the deep neural network (DNN) are able to identify malfunctions with precision up to 99%.

Study [17] leverages a two-dimensional CNN deployed to STM32F767ZI microcontroller by means of X-CUBE-AI tool to predict remaining useful life (RUL) of turbofan engines. Enhanced by L1 norm weight pruning and Adam optimization algorithm retraining, this method still achieves acceptable accuracy comparing to Cloud AI deployment.

**Brain-Computer Interface.** In the healthcare industry, TinyML offers immense potential, notably in areas such as tumor and cancer detection, emotional intelligence, and predicting health conditions using EEG and ECG signals [18]. TinyML technologies empower Adaptive Deep Brain Stimulation (aDBS) systems [19], which are on the brink of achieving significant advancements in clinical applications. aDBS is crucial for pinpointing specific biomarkers and symptoms related to diseases by directly recording brain signals. Given that healthcare often involves gathering vast amounts of data and processing this information to devise timely interventions for patients, creating a system that is both highly accurate and secure is essential. This integration of IoT with TinyML within the realm of medical science gives rise to what is known as the Healthcare Internet of Things (H-IoT) [20]. H-IoT's primary uses include monitoring, diagnostics, controlling the spread of diseases, logistics, and support systems. For remote health status monitoring of patients, it's critical to develop a system that is not only reliable but also features minimal latency and is globally accessible. Such a system can be realized by combining H-IoT with TinyML and leveraging 6G-enabled internet service [21].

**Autonomous Vehicles.** Autonomous vehicles play a pivotal role in various emergency scenarios, including military operations, human tracking, and industrial uses. These vehicles require advanced navigation capabilities for the effective detection and tracking of targeted objects. The challenge of enabling autonomous navigation becomes particularly pronounced with smaller-scale vehicles. TinyML technology has been applied to enhance the autonomous operation of such mini-vehicles, as demonstrated in a study using the GAP8 MCI [22], which incorporates a convolutional neural network

(CNN) framework. This technology was also tested on the STM32L4 and NXP k64f platforms, revealing that TinyML integration can decrease processing delays by up to 13 times while achieving an energy efficiency improvement of about 90%.

Furthermore, the exploration of automatic traffic scheduling has gained attention as a potential area for TinyML application to enhance real-time traffic management systems [23]. One innovative approach involves using piezoelectric sensors embedded across various lanes on a road, employing a two-point time ratio technique to detect vehicles through piezo-sensor data. This method extends to vehicle classification and the prediction of green light timing, using a random forest regressor to determine signal duration based on the vehicle count in each lane. This system was implemented on an Arduino Uno, utilizing the m2gen library compatible with Scikit Learn.

#### **Phenomics and conservation of ecology.**

Phenomics is the examination of how an organism's phenotypes evolve in response to genetic variations throughout its life. In the realm of plant phenomics, this field is particularly focused on identifying significant germplasm by leveraging genetic advancements across various plant species. A study referenced in [24] explored phenomics through image analysis, specifically targeting the classification of tomato leaf diseases and spider mite infestations. This research utilized the Plant-Village tomato dataset alongside the YOLO3 algorithm, powered by the DarkNet-53 architecture, for the automated detection of tomato leaves. Additionally, the study applied the SegNet algorithm for pixel-wise image segmentation. It also reviewed various data analysis tools to assess their compatibility with TinyML for phenomics research.

In the sphere of ecological conservation, AI-driven analytics have seen substantial advancement. A notable study [25] implemented TinyML in small payload satellites (SmallSats) to enhance the conservation efforts for sea turtles through real-time, vision-based TinyML techniques. TinyML's application extends to environmental monitoring as well; for instance, [26] detailed a compact deep neural network designed for weather prediction. This system, built on the STM32 microcontroller unit (MCU) and employing the X-CUBE-AI toolchain within the Miosix operating system, requires 45.5 KB of flash memory and 480 Bytes of onboard RAM to function.

**Anomaly detection.** An anomaly refers to an occurrence that deviates from the norm or the bulk of events. The study cited in [27] explores the suitability of TinyML for identifying anomalies in specific tasks. Employing a conventional Artificial Neural Network (ANN), along with an auto-encoder and a variational auto-encoder, the research utilizes the Arduino Nano 33 BLE Sense module and a Kenmore top load washing machine model to pinpoint anomalies during the

unbalanced spin dry cycle. The findings indicate a high level of precision and accuracy, reaching around 90%.

In [28] low-cost thermal infrared sensor with  $32 \times 24$  pixels is used to detect anomalies on heat maps of different machines. CNN running on an ESP-WROOM-32 MCU device was able to reach accuracy as high as 99.73%.

**Challenges.** TinyML faces significant challenges that impede its growth and development. To summarize them and evaluate their importance, most cited review articles and surveys on the topic were identified in Google Scholar database [1; 3; 8; 29; 30; 31; 32; 33; 34]. Further on, most cited review papers from 2024 [6; 7; 35; 36; 37] were added to include the latest insights as well. Only studies in the English language were considered.

Most prominent problems and challenges are presented and discussed below ranked from most to least mentioned. Some of them are renamed for unification.

#### 1. Limited Memory Capacity.

Most edge devices feature no more than a few hundred KB of RAM memory, and several MB of flash (permanent) storage. The volume is consumed by ML model as well as by the sensor measurements gathered through time. The measurements might be useful to overcome possible concept drift: evolution of the environment that makes input data dissimilar to those used in training set. As a result, the performance of ML model degrades. One possible solution is to leverage online, on-device learning [13] but this will consume more energy as well as processing capacity. Another solution is to store data on a neighbor edge server and access them on-demand, but this can increase network overhead which consumes energy as well [34].

#### 2. Energy Efficiency.

TinyML accommodates the energy efficiency limitation in its paradigm. Minimizing energy consumption is crucial for battery-powered or solar-powered edge devices, which have strict energy quota. Energy is consumed by MCU, by network modules, by sensors, etc. Ideally, each of the components must be flexible enough to lower power consumption according to current workload and operating context. That is, MCU must dynamically switch to lower frequency when performing non-critical tasks, network module must adapt network protocol and transmission power according to the distance to the furthest receiver, sensors must adjust the sampling frequency according to the measurements change over time. These are future directions for inquiry. Today an MCU can be put to deep sleep till the next awake signal either from sensor or another peripheral module. Otherwise, it normally operates at maximum frequency. The same principle is for other components: most of them can be turned on or off, can work on pre-defined settings but are unable to adapt automatically. Another common approach for the problem is task offloading or federated execution [38].

### 3. Processor Power.

Most edge devices operate within a clock speed range of 10–1000 MHz. This range can be limiting for the execution of complex learning models directly on edge devices, affecting the performance and responsiveness of TinyML applications. To overcome these limitations, alternative architectures are researched such as PULP (parallel ultra- low power) [39]. It is demonstrated that PULP test implementation is 12.87x faster in comparison to ARM Cortex-M4. Nevertheless, in many practical cases such speed is extensive. Clear tendency to use low-power off-the-shelf devices such as Arduino Nano 33 BLE (ARM Cortex M4, 64 MHz) is shown in [6].

### 4. Device Heterogeneity.

This problem refers to the variability in the characteristics of different edge devices used for ML. It's caused by several reasons: different manufacturers adhere to different architectures and even more architectures and frameworks are proposed every year in new studies. Furthermore, Hardware Heterogeneity usually causes Software Heterogeneity as device drivers and operating systems are incompatible in most cases. Another side of it is the existence of multiple ML frameworks and inference engines which generate incompatible ML models, i.e. cause Models Heterogeneity. As of now, there are no realistic solutions proposed for the problem.

### 5. Benchmarking.

Hardware and Software Heterogeneity causes natural need to compare device performance when it comes to ML inference. And memory and processor limitations restrict usage of existing ML benchmarks which target more powerful computers. There were several benchmarks created to fill the gap: MLPerf Tiny Benchmark[6], “TinyML benchmark”[40] and BiomedBench[41]. Still, together they cover only a small fraction of devices, datasets and ML models

used today. Also, they don't include more advanced algorithms such as transfer learning or online learning.

### 6. Lack of Datasets and Models.

There is large number of datasets mentioned in the papers. But only some of them are made public. And only part of those demonstrate good balance, diversity and are properly annotated. Addressing the lack of datasets problem in TinyML involves strategies such as data augmentation, synthetic data generation, transfer learning, and few-shot learning techniques.

Lack of Accepted Models problem refers to the absence of widely accepted public ML models. And it's closely related to Lack of Datasets and Device Heterogeneity problems. Which means that such a model must be trained on a good-quality public dataset and must be deployable to most popular devices without considerable loss of model metrics. One of the explanations of the problem presence is that the entire TinyML field is still too young and immature to construct proper tools and implement the solution.

**Conclusions.** TinyML emerged as a response to the growing need for bringing machine learning capabilities to resource-constrained devices, such as those used in IoT applications. It addresses the challenge of implementing AI in environments where computing power, memory, and energy availability are limited. By optimizing ML models to run efficiently on small, low-power devices, TinyML enables intelligent data processing at the edge, reducing the need for constant cloud connectivity and thus enhancing privacy, response times, and operational efficiency.

Still there are serious challenges to consider before deploying ML models to edge devices. This leaves multiple opportunities for further research directions in the field.

## REFERENCES

1. Dutta, L., & Bharali, S. (2021). TinyML meets IoT: A comprehensive survey. *Internet of Things*, 16, 100461.
2. Fraga-Lamas, P., Lopes, S. I., & Fernández-Caramés, T. M. (2021). Green IoT and edge AI as key technological enablers for a sustainable digital transition towards a smart circular economy: An industry 5.0 use case. *Sensors*, 21(17), 5745.
3. Schizas, N., Karras, A., Karras, C., & Sioutas, S. (2022). TinyML for ultra-low power AI and large scale IoT deployments: a systematic review. *Future Internet*, 14(12), 363.
4. Warden, P., & Situnayake, D. (2019). TinyML: Machine learning with TensorFlow Lite on Arduino and ultra-low-power microcontrollers. O'Reilly Media.
5. Pramod, A., Naicker, H. S., & Tyagi, A. K. (2021). Machine learning and deep learning: Open issues and future research directions for the next 10 years. *Computational analysis and deep learning for medical care: Principles, methods, and applications*, 463–490.
6. Capogrosso, L., Cunico, F., Cheng, D. S., Fummi, F., & Cristani, M. (2024). A machine learning-oriented survey on tiny machine learning. *IEEE Access*.
7. Kallimani, R., Pai, K., Raghuvanshi, P., Iyer, S., & López, O. L. (2024). TinyML: Tools, applications, challenges, and future research directions. *Multimedia Tools and Applications*, 83(10), 29015-29045.
8. Rajapakse, V., Karunanayake, I., & Ahmed, N. (2023). Intelligence at the extreme edge: A survey on reformable TinyML. *ACM Computing Surveys*, 55(13s), 1-30.

9. Banbury, C. R., Reddi, V. J., Lam, M., Fu, W., Fazel, A., Holleman, J., ... & Yadav, P. (2020). Benchmarking TinyML systems: Challenges and direction. arXiv preprint arXiv:2003.04821.
10. Kwon, J., & Park, D. (2021). Hardware/software co-design for TinyML voice-recognition application on resource frugal Edge Devices. *Applied Sciences*, 11(22), 11073.
11. Paul, A. J., Mohan, P., & Sehgal, S. (2020, December). Rethinking generalization in american sign language prediction for edge devices with extremely low memory footprint. In 2020 IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS) (pp. 147–152). IEEE.
12. Patil, S. G., Dennis, D. K., Pabbaraju, C., Shaheer, N., Simhadri, H. V., Seshadri, V., ... & Jain, P. (2019, October). Gesturepod: Enabling on-device gesture-based interaction for white cane users. In Proceedings of the 32nd Annual ACM symposium on User Interface Software and technology (pp. 403–415).
13. Ren, H., Anicic, D., & Runkler, T. A. (2021, July). TinyOL: TinyML with online-learning on microcontrollers. In 2021 international joint conference on neural networks (IJCNN) (pp. 1–8). IEEE.
14. Cai, H., Gan, C., Zhu, L., & Han, S. (2020). TinyTL: Reduce activations, not trainable parameters for efficient on-device learning. arXiv preprint arXiv:2007.11622.
15. Rashid, H. A., Ren, H., Mazumder, A. N., & Mohsenin, T. (2021). Tiny RespNet: a scalable multimodal tinyCNN processor for automatic detection of respiratory symptoms. In TinyML Research Symposium (pp. 1–8).
16. Chen, Z., Gao, Y., & Liang, J. (2023). LOPdM: A Low-power On-device Predictive Maintenance System Based on Self-powered Sensing and TinyML. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.
17. Athanasakis, G., Filios, G., Katsidimas, I., Nikolettseas, S., & Panagiotou, S. H. (2022, September). TinyML-based approach for remaining useful life Prediction of Turbofan Engines. In 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (pp. 1-8). IEEE.
18. Pai, K., Kallimani, R., Iyer, S., Maheswari, B. U., Khanai, R., & Torse, D. (2022). A Survey on Brain-Computer Interface and Related Applications. arXiv preprint arXiv:2203.09164.
19. Merk, T., Peterson, V., Köhler, R., Haufe, S., Richardson, R. M., & Neumann, W. J. (2022). Machine learning based brain signal decoding for intelligent adaptive deep brain stimulation. *Experimental Neurology*, 351, 113993.
20. Bharadwaj, H. K., Agarwal, A., Chamola, V., Lakkaniga, N. R., Hassija, V., Guizani, M., & Sikdar, B. (2021). A review on the role of machine learning in enabling IoT based healthcare applications. *IEEE Access*, 9, 38859-38890.
21. Padhi, P. K., & Charrua-Santos, F. (2021). 6G enabled tactile internet and cognitive internet of healthcare everything: Towards a theoretical framework. *Applied System Innovation*, 4(3), 66.
22. de Prado, M., Rusci, M., Capotondi, A., Donze, R., Benini, L., & Pazos, N. (2021). Robustifying the deployment of TinyML models for autonomous mini-vehicles. *Sensors*, 21(4), 1339.
23. Roshan, A. N., Gokulapriyan, B., Siddarth, C., & Kokil, P. (2021, March). Adaptive traffic control with TinyML. In 2021 Sixth International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET) (pp. 451-455). IEEE.
24. Nakhle, F., & Harfouche, A. L. (2021). Ready, Steady, Go AI: A practical tutorial on fundamentals of artificial intelligence and its applications in phenomics image analysis. *Patterns*, 2(9).
25. Curnick, D. J., Davies, A. J., Duncan, C., Freeman, R., Jacoby, D. M., Shelley, H. T., ... & Petteorelli, N. (2022). SmallSats: a new technological frontier in ecology and conservation?. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 8(2), 139–150.
26. Alongi, F., Ghielmetti, N., Pau, D., Terraneo, F., & Fornaciari, W. (2020, September). Tiny neural networks for environmental predictions: An integrated approach with miosix. In 2020 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP) (pp. 350-355). IEEE.
27. Lord, M., & Kaplan, A. (2021, December). Mechanical anomaly detection on an embedded microcontroller. In 2021 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI) (pp. 562–568). IEEE.
28. Oliveira, V. M., & Moreira, A. H. (2021). Edge AI System Using a Thermal Camera for Industrial Anomaly Detection. In International Summit Smart City 360° (pp. 172-187). Cham: Springer International Publishing.
29. Sanchez-Iborra, R., & Skarmeta, A. F. (2020). Tinyml-enabled frugal smart objects: Challenges and opportunities. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 20(3), 4-18.
30. Ray, P. P. (2022). A review on TinyML: State-of-the-art and prospects. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 34(4), 1595-1623.
31. Saha, S. S., Sandha, S. S., & Srivastava, M. (2022). Machine learning for microcontroller-class hardware: A review. *IEEE Sensors Journal*, 22(22), 21362-21390.

32. Su, W., Li, L., Liu, F., He, M., & Liang, X. (2022). AI on the edge: a comprehensive review. *Artificial Intelligence Review*, 55(8), 6125-6183.
33. Alajlan, N. N., & Ibrahim, D. M. (2022). TinyML: Enabling of inference deep learning models on ultra-low-power IoT edge devices for AI applications. *Micromachines*, 13(6), 851.
34. Abadade, Y., Temouden, A., Bamoumen, H., Benamar, N., Chtouki, Y., & Hafid, A. S. (2023). A comprehensive survey on tinyml. *IEEE Access*.
35. Tsoukas, V., Gkogkidis, A., Boumpa, E., & Kakarountas, A. (2024). A Review on the emerging technology of TinyML. *ACM Computing Surveys*.
36. Jouini, O., Sethom, K., Namoun, A., Aljohani, N., Alanazi, M. H., & Alanazi, M. N. (2024). A Survey of Machine Learning in Edge Computing: Techniques, Frameworks, Applications, Issues, and Research Directions. *Technologies*, 12(6), 81.
37. Laskaridis, S., Venieris, S. I., Kouris, A., Li, R., & Lane, N. D. (2024). The future of consumer edge-ai computing. *IEEE Pervasive Computing*.
38. Zhou, H., Jiang, K., Liu, X., Li, X., & Leung, V. C. (2021). Deep reinforcement learning for energy-efficient computation offloading in mobile-edge computing. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(2), 1517-1530.
39. Tabanelli, E., Tagliavini, G., & Benini, L. (2023). DNN is not all you need: Parallelizing non-neural ML algorithms on ultra-low-power IoT processors. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 22(3), 1-33.
40. Sudharsan, B., Salerno, S., Nguyen, D. D., Yahya, M., Wahid, A., Yadav, P., ... & Ali, M. I. (2021, June). Tinyml benchmark: Executing fully connected neural networks on commodity microcontrollers. In *2021 IEEE 7th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)* (pp. 883-884). IEEE.
41. Samakovlis, D., Albin, S., Álvarez, R. R., Constantinescu, D. A., Schiavone, P. D., Peón-Quirós, M., & Atienza, D. (2024). BiomedBench: A benchmark suite of TinyML biomedical applications for low-power wearables. *IEEE Design & Test*.

## МЕТОД НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО ВИЯВЛЕННЯ ПРИЙОМІВ ПРОПАГАНДИ ЗА МАРКЕРАМИ З ВІЗУАЛЬНОЮ ІНТЕРПРЕТАЦІЄЮ ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ

**Молчанова М. О.**

*викладач кафедри комп'ютерних наук  
Хмельницький національний університет  
вул. Інститутська, 11, Хмельницький, Україна  
[orcid.org/0000-0001-9810-936X](https://orcid.org/0000-0001-9810-936X)  
[m.o.molchanova@gmail.com](mailto:m.o.molchanova@gmail.com)*

**Бармак О. В.**

*доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри комп'ютерних наук  
Хмельницький національний університет  
вул. Інститутська, 11, Хмельницький, Україна  
[orcid.org/0000-0003-0739-9678](https://orcid.org/0000-0003-0739-9678)  
[alexander.barmak@gmail.com](mailto:alexander.barmak@gmail.com)*

**Ключові слова:** BERT,  
візуальна інтерпретація  
прийнятих рішень, прийоми  
пропаганди, маркери прийомів  
пропаганди.

У статті запропоновано метод нейромережевого виявлення прийомів пропаганди за маркерами з візуальною інтерпретацією прийнятих рішень, який відрізняється від існуючих тим, що враховує при навчанні нейромережевих класифікаторів додаткову множину маркерів та дозволяє здійснювати візуальну інтерпретацію отриманих результатів. Під додатковою множиною маркерів мається на увазі використання різноманітних текстових ознак, які притаманні визначеним прийомам пропаганди. Крокami методу є попередня обробка усіх навчальних і тестових текстових даних, навчання нейромережевих моделей для ідентифікації кожного маркера пропаганди, навчання нейромережевих моделей для кожного прийому пропаганди, створення моделі для поясненості та інтерпретації отриманих прогнозів для кожної моделі виявлення прийомів пропаганди, нейромережева оцінка сили прояву прийомів пропаганди у тестовому тексті та інтерпретація значень моделлю LIME.

Для дослідження ефективності методу нейромережевого виявлення прийомів пропаганди було створено програмну реалізацію у вигляді набору ноутбуків, реалізованих у хмарному сервісі «Google Colab», що призначені для навчання нейромережевих моделей BERT із подальшим збереженням їх для використання у вебзастосунку для виявлення прийомів пропаганди, а також набору ноутбуків для збереження нейромережевих моделей для виявлення сили прояву маркерів пропаганди. Створений вебзастосунок не лише дозволяє визначити інтенсивність проявів прийомів пропаганди, а і дає можливість здійснювати візуальну аналітику отриманих результатів. Для навчання нейромережевих моделей виявлення прийомів пропаганди використано набір даних, що налічує 550 статей і представляє собою корпус новинних статей, анотованих вручну на рівні фрагментів за допомогою вісімнадцяти пропагандистських прийомів. Дослідження ефективності встановило, що розроблений метод дозволяє шляхом використання набору з 17 навчених BERT-моделей виявляти 17 відповідних прийомів пропаганди з точністю не нижче 81.87%.



## METHOD OF NEURAL NETWORK DETECTING OF PROPAGANDA TECHNIQUES BY MARKERS WITH VISUAL INTERPRETATION OF DECISIONS MADE

**Molchanova M. O.**

*Lecturer at the Department of Computer Sciences  
Khmelnyskyi National University  
Institutska str., 11, Khmelnytskyi, Ukraine  
orcid.org/0000-0001-9810-936X  
m.o.molchanova@gmail.com*

**Barmak O. V.**

*Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
Head of the Department of Computer Sciences  
Khmelnyskyi National University  
Institutska str., 11, Khmelnytskyi, Ukraine  
orcid.org/0000-0003-0739-9678  
alexander.barmak@gmail.com*

**Key words:** *BERT, visual interpretation of decisions made, propaganda techniques, markers of propaganda techniques.*

The article proposes method of neural network detecting of propaganda techniques by markers with visual interpretation of decisions made, which differs from the existing ones in that it takes into account an additional set of markers when training neural network classifiers, and allows visual interpretation of obtained results. The additional set of markers refers to use of various text features inherent in certain propaganda techniques. The steps of the method are pre-processing of all training and test text data, training of neural network models to identify each propaganda marker, training of neural network models for each propaganda technique, creation of model for explanation and interpretation of obtained predictions for each model of detection of propaganda techniques, neural network evaluation of the manifestation strength of propaganda techniques in the test text and interpretation of the values by LIME model.

To effectiveness research of method for detecting propaganda techniques, software implementation was created in the form of the set of notebooks implemented in the Google Colab cloud service, designed for training BERT neural network models and then saving them for use in a web application for detecting propaganda techniques, as well as a set of notebooks for preservation of neural network models to detect the strength of manifestation of propaganda markers. The created web application allows not only determining the intensity of manifestations of propaganda techniques, but also provides an opportunity to perform visual analytics of the obtained results. For training of neural network models for detection of propaganda techniques, the dataset consisting of 550 articles was used, which is the corpus of news articles manually annotated at fragment level using eighteen propaganda techniques. The effectiveness study established that the developed method allows, by using set of 17 trained BERT models, to detect 17 relevant propaganda techniques with an accuracy of no less than 81.87%.

**Вступ.** Пропаганда, замаскована під звичайні новини, поширюється протягом багатьох десятиліть, а сучасна цифрова епоха створює додаткові умови для її швидшого, масового та ефективного розповсюдження [1]. Розробляються нові сучасні методи генерації текстів, які дедалі частіше важко відрізнити від створених людиною [2], що призво-

дить до стрімкого зростання кількості контенту. В свою чергу, це підкреслює важливість розробки автоматизованих методів виявлення пропагандистських прийомів, які допоможуть користувачам отримувати інформацію більш усвідомлено.

У статті пропонується метод виявлення пропагандистських прийомів за допомогою викори-

стання моделі комбінацій семантичних маркерів, який базується на використанні набору моделей машинного навчання. Пропонується використувати окремі створені для кожного конкретного пропагандистського прийому моделі машинного навчання, що навчені на модифікованих розмічених даних із доповненою множиною маркерів.

**Огляд літератури.** На сучасному етапі науковці працюють над виявленням нових маркерів та нових прийомів пропаганди, а також над покращенням існуючих підходів для її виявлення.

Так, у [1] досліджено основні методи аналізу газетних текстів для виявлення маніпулятивних технологій, що допомагає застерегти від дезінформації та пропаганди. Представлено новий набір еталонних даних чеською мовою для навчання та оцінки сучасних і майбутніх методів розпізнавання 18 маніпулятивних прийомів, таких як нагнітання страху, релятивізація та навішування ярликів. Показано, що поєднання контент-аналізу з запропонованим стильовим аналізом підвищує точність виявлення 15 з 17 оцінених маніпулятивних прийомів від 0.05% до 1.46%.

У [2] наведено багатомовний набір даних про пропаганду та проведено експеримент для дослідження маркерів, за якими людські анотатори та алгоритми класифікації відрізняють пропагандистські статті від непропагандистських на певну тему. Показано, що перебільшення, зменшення описовості та відсутність адекватних джерел часто зустрічаються у пропагандистській пресі. Аналізатор VAGO підтвердив, що використання невизначених маркерів значно корелює з цими особливостями. Виявлено, що моделі машинного навчання ефективні для виявлення пропаганди на певну тему, але потребують покращення щодо пояснюваності та узагальнення на інші теми.

У [3] розглядається застосування моделі MVPROP, що використовує багатовимірні контекстні вбудовування, дозволяє покращити точність виявлення пропаганди. Основним обмеженням є слабкі анотації через великий масштаб даних.

У [4] розглядалося виявлення 17 відомих прийомів пропаганди, за які відповідають певні маркери, які притаманні використовуваним прийомам. В [5] аналізувались можливості використання великих мовних моделей (LLMs), зокрема моделі GPT-3.5-Turbo від OpenAI, для виявлення ознак пропаганди в новинних статтях. Дослідження показало, що технологія LLM може давати розумні висновки про пропаганду, хоча точність виявлення складає всього 25.12% за датасетом SemEval-2022.

**Метою роботи** є створення методу нейромережевого виявлення прийомів пропаганди за маркерами з візуальною інтерпретацією прийнятих рішень.

Метод нейромережевого виявлення прийомів пропаганди за маркерами. Метод нейромережевого виявлення прийомів пропаганди за маркерами призначений для оцінки текстового контенту на предмет наявності прийомів пропаганди та визначення сили їх проявів. Метод відрізняється від існуючих тим, що враховує при навчанні нейромережевих класифікаторів додаткову множину маркерів та дозволяє здійснювати візуальну інтерпретацію отриманих результатів. Під додатковою множиною маркерів мається на увазі використання різноманітних текстових ознак [6], які притаманні визначеним прийомам пропаганди. У таблиці 1 наведено приклад сили проявів додаткових маркерів «Емоційність тексту», «Булінг», «Страх», «Мова ворожнечі» у прийомах пропаганди.

Схема кроків методу виявлення прийомів пропаганди за маркерами з візуальною інтерпретацією прийнятих рішень наведена на рис. 1. Метод призначений для перетворення вхідних даних у вигляді множини навчальних текстів для ідентифікації кожного маркера пропаганди, множини навчальних текстів для кожного прийому пропаганди та тестового тексту для виявлення прийомів пропаганди у вихідні дані у вигляді множини навчених нейромережевих моделей для ідентифікації кожного з прийомів пропаганди, множини навчених нейромережевих моделей для ідентифікації

Таблиця 1

Сила проявів маркерів для прийомів пропаганди

Приєм пропаганди	Емоційність тексту	Булінг	Страх	Мова ворожнечі
«Appeal to Fear-Prejudice»	Висока	Висока	Висока	Нейтрально
«Causal Oversimplification»	Нейтрально	Нейтрально	Нейтрально	Низька
«Doubt»	Нейтрально	Нейтрально	Висока	Нейтрально
«Exaggeration»	Висока	Нейтрально	Нейтрально	Нейтрально
«Labeling»	Нейтрально	Нейтрально	Нейтрально	Висока
«Loaded Language»	Висока	Нейтрально	Нейтрально	Висока
«Minimization»	Нейтрально	Нейтрально	Нейтрально	Низька
«Name Calling»	Нейтрально	Висока	Нейтрально	Висока
«Reductio ad Hitlerum»	Висока	Нейтрально	Висока	Висока
«Whataboutism»	Нейтрально	Нейтрально	Нейтрально	Висока

кожного маркера з доповненої множини маркерів, та відсоток сили прояву кожного прийому пропаганди в тексті із візуальною інтерпретацією прийнятих нейромережами рішень.

Першим кроком є попередня обробка усіх текстових даних, як навчальних, так і текстових. Вона включає видалення знаків пунктуації та видалення стоп-слів.

На другому кроці здійснюється навчання нейромережових моделей для ідентифікації кожного маркера пропаганди, які використовуються для розмітки навчальних текстів для кожного прийому пропаганди, а також для розмітки щодо наявності маркерів тестових текстів.

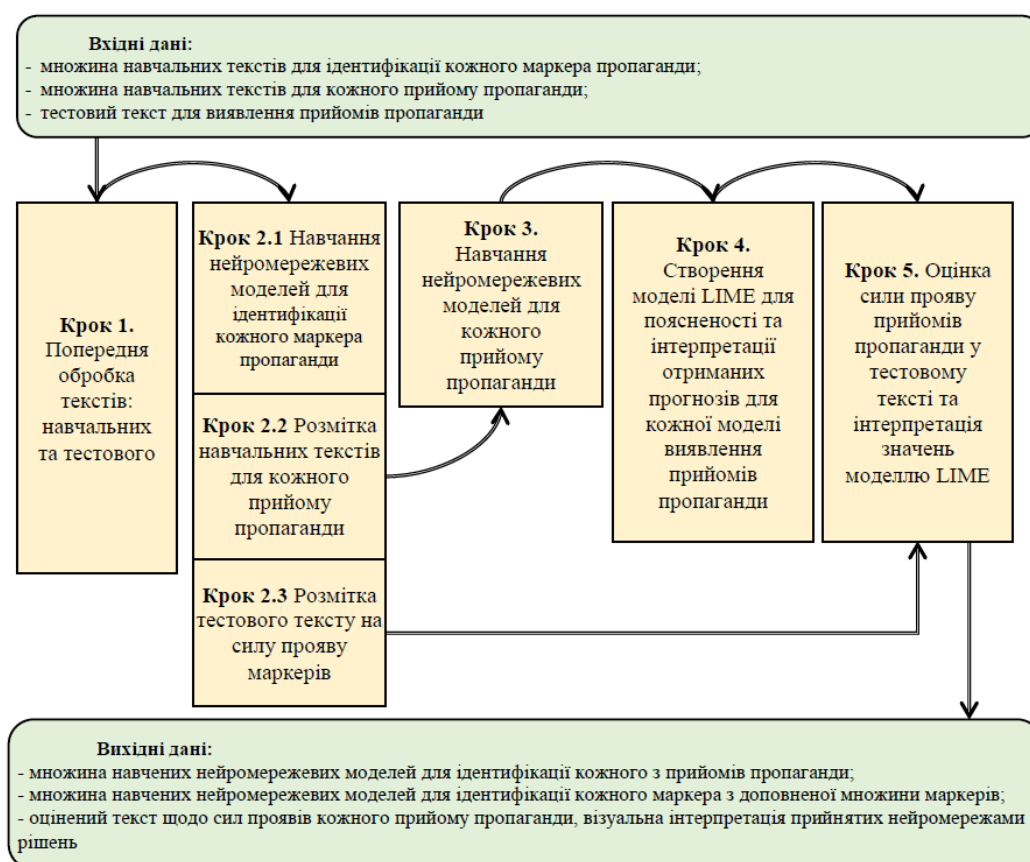
Третім кроком є навчання нейромережових моделей для кожного прийому пропаганди. Кількість нейромережових моделей у даному дослідженні складає 17 і покриває основні прийоми пропаганди, такі як: «Appeal to fear-prejudice», «Causal Oversimplification», «Doubt», «Exaggeration», «Flag-Waving», «Labeling», «Loaded Language», «Minimisation», «Name Calling», «Repetition», «Appeal to Authority», «Black and White Fallacy», «Reductio ad hitlerum», «Red Herring», «Slogans», «Thought terminating Cliches», «Whataboutism» [4; 7].

На четвертому кроці відбувається створення моделі LIME для поясненості та інтерпретації отриманих прогнозів для кожної моделі виявлення прийомів пропаганди, які разом із навченими нейромережовими моделями на кроці 3 будуть оцінювати користувачський текст.

На п'ятому кроці відбувається нейромережева оцінка сили прояву прийомів пропаганди у тестовому тексті та інтерпретація значень моделлю LIME.

Відповідно, вихідними даними є множина навчених нейромережових моделей для ідентифікації кожного з прийомів пропаганди, множина навчених нейромережових моделей для ідентифікації кожного маркера з доповненої множини маркерів та оцінений текст щодо сил проявів кожного прийому пропаганди, з візуальною інтерпретацією прийнятих нейромережами рішень.

**Підхід до формування множини нейромережових моделей** для виявлення прийомів пропаганди та моделей LIME для інтерпретованості прогнозів навчених моделей наведена на рис. 2. Вхідними даними є множина навчальних текстів для кожного прийому пропаганди та доповнена множина маркерів до кожного з навчальних текстів.



**Рис. 1. Схема кроків методу нейромережевого виявлення прийомів пропаганди за маркерами**

Таблиця 2

Ефективність виявлення пропаганди з метрикою Assurasy

Прийоми пропаганди	Моделі для виявлення прийомів пропаганди		
	«bert-base-multilingual-cased»	«roberta-base»	«ukr-electra-base»
Appeal to fear-prejudice	0.81	0.80	<b>0.88</b>
Causal Oversimplification	0.78	0.79	<b>0.82</b>
Doubt	<b>0.93</b>	0.90	0.87
Exaggeration	0.80	<b>0.82</b>	0.80
Flag-Waving	<b>0.92</b>	0.90	0.89
Labeling	<b>0.96</b>	0.94	<b>0.96</b>
Loaded Language	0.93	<b>0.97</b>	0.94
Minimisation	0.89	0.86	<b>0.91</b>
Name Calling	0.92	0.92	0.91
Repetition	0.93	<b>0.94</b>	<b>0.94</b>
Appeal to Authority	0.87	<b>0.89</b>	0.88
Black and White Fallacy	0.89	<b>0.91</b>	0.88
Reductio ad hitlerum	0.85	<b>0.87</b>	0.86
Red Herring	0.67	<b>0.89</b>	0.78
Slogans	0.84	<b>0.86</b>	0.83
Thought terminating Cliches	<b>0.83</b>	0.73	0.79
Whataboutism	<b>0.83</b>	0.78	0.78

Першим кроком є попередня обробка навчальних текстів, що включає в себе видалення знаків пунктуації, зайвих пробілів та стоп-слів.

Другим кроком є навчання нейронмережових моделей для кожного прийому пропаганди. У якості нейронмережових моделей було використано BERT-подібні моделі, оскільки даний вид моделей машинного навчання дозволяє розуміти контекст, що є важливим фактором при виявленні прийомів пропаганди.

Було проведено окреме дослідження щодо порівняння BERT-подібних моделей RoBERTa, BERT та ELECTRA. Для цього були використані попередньо натреновані моделі з ресурсу Hugging Face [8], які було донавчені протягом 3-х епох навчання. У табл. 2 наведено одержану ефективність BERT-подібних моделей з виявлення прийомів пропаганди за метрикою Assurasy, згідно з якою обиралися моделі для виявлення окремих прийомів пропаганди.

Після процесу навчання на третьому кроці кожна модель оцінюється за метриками точності, влучності та повноти. Для моделей, що показали високу ефективність за метриками, виконується четвертий крок – створення моделі LIME для пояснення та інтерпретації отриманих прогнозів для кожної моделі виявлення прийомів пропаганди.

Модель LIME слугує як для пояснення текстових даних, так і для числових, дозволяють інтерпретувати, як модель приймає рішення на основі вхідних даних.

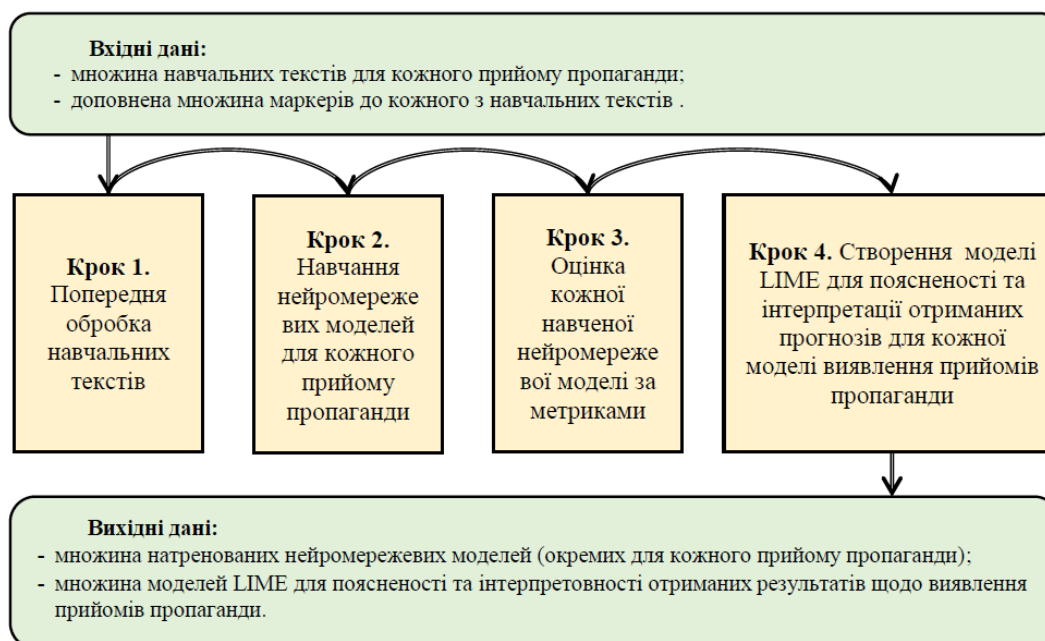


Рис. 2. Схема формування нейронмережових моделей для виявлення прийомів пропаганди та моделей LIME для інтерпретованості прогнозів навчених моделей

Вихідними даними є множина натренованих нейромережових моделей (окремих для кожного прийому пропаганди) та множина моделей LIME для поясненості та інтерпретовності отриманих результатів щодо виявлення прийомів пропаганди нейромережовими моделями.

Формування навчального набору даних для нейромереж виявлення прийомів пропаганди наведено на рис. 3 та відбувається шляхом перетворення вхідних даних у вигляді множини навчених нейромереж до оцінки сили прояву кожного маркеру з доповненої множини маркерів та множини навчальних текстів для кожного прийому пропаганди у вихідні дані у вигляді розміченої множини навчальних текстів для кожного прийому пропаганди за силами прояву кожного з маркерів із доповненої множини маркерів.

Відповідно, вихідними даними є розмічені множина навчальних текстів для кожного із 17 прийомів пропаганди за силами прояву кожного з маркерів із доповненої множини маркерів.

Такими чином, розроблений метод нейромережового виявлення прийомів пропаганди дозволяє не лише оцінити наявність кожного прийому пропаганди у тексті, а також отримати візуальну поясненість отриманих результатів.

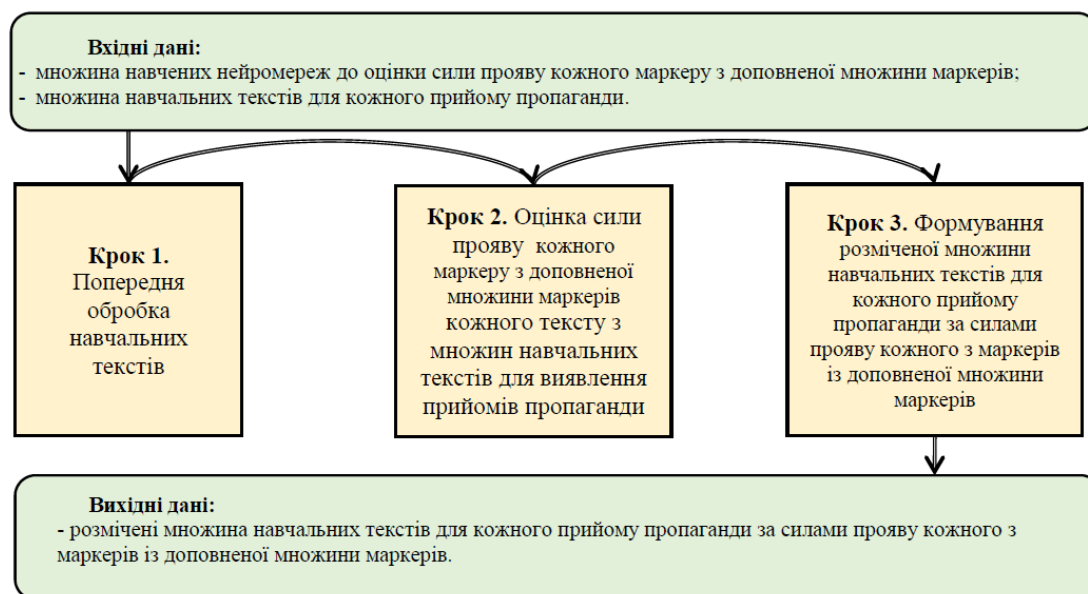
**Дослідження ефективності методу.** Для експериментального дослідження для оцінки ефективності розробленого методу нейромережового виявлення прийомів пропаганди було створено програмну реалізацію, яка складається із наборів ноутбуків реалізованих у хмарному сервісі «Google Colab», що призначені для навчання нейромережових моделей BERT із подальшим збере-

женням їх на жорсткому диску для використання у вебзастосунку для виявлення прийомів пропаганди, а також набору ноутбуків для збереження нейромережових моделей для виявлення сили прояву маркерів пропаганди. Вебзастосунок реалізовано засобами мови Python використовуючи середовище розробки PyCharm.

Для навчання моделей машинного навчання, що виконують функції виявлення прийомів пропаганди, було використано набір даних «emnlp\_trans\_uk\_dataset», взятий з Kaggle-змагань «Disinformation Detection Challenge» [9]. Набір даних сформований командою «Analysis Project» [10], яка провела аналіз текстів і виявила всі текстові фрагменти, що містять пропагандистські прийоми, а також їх тип. «Analysis Project» створено корпус з 550 новинних статей на основі [11], анотованих вручну на рівні фрагментів за допомогою вісімнадцяти пропагандистських прийомів. Розподіл статей за довжиною в символах наведено на рис. 4.

Як видно з графіку на рисунку 4, для більшості прийомів пропаганди довжина текстів де вони представлені особливої ролі не грають. Однак, «Flag Waving», «Red Herring», «Reductio ad hitlerum» та «Whataboutism» все ж мають меншу максимальну довжину в текстах, де вони представлені.

Для тренування моделей машинного навчання даний датасет було модифіковано таким чином, щоб текст що містить кожен прийом пропаганди був розміщений в окремому каталозі. Після такого перерозподілу було виведено статистику наявних текстів, що репрезентують прийоми пропаганди. Статистика наведена на рис. 5.



**Рис. 3. Кроки для формування навчального набору даних для нейромережового виявлення прийомів пропаганди**

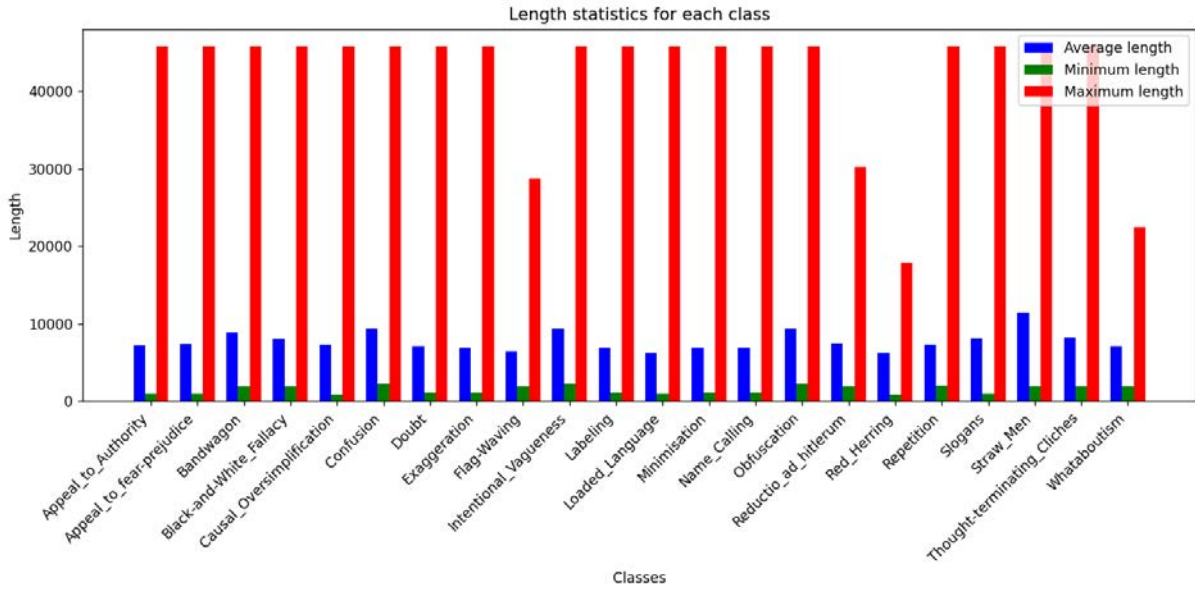


Рис. 4. Статистика за довжиною у символах по прийомам пропаганди

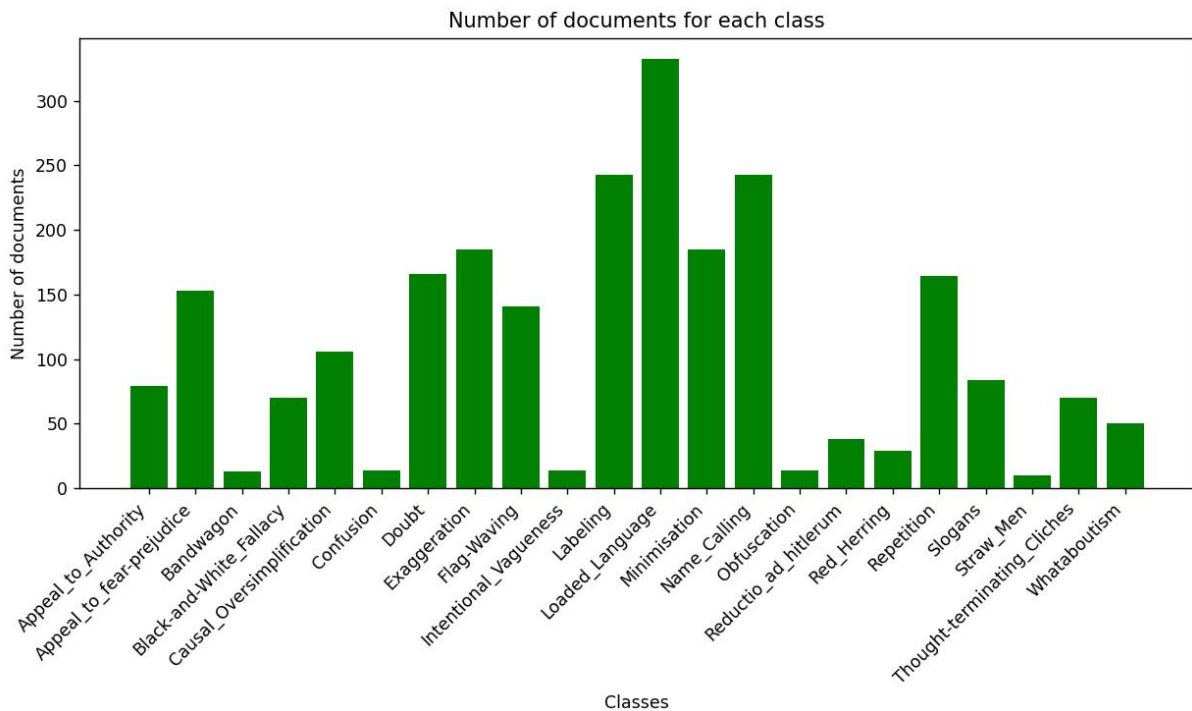


Рис. 5. Статистика по кількості текстів за прийомами пропаганди, шт

Як видно з рис. 5, деякі прийоми пропаганди, такі як «Bandwagon», «Confusion», «Intentional Vagueness», «Obfuscation» та «Straw Men», представлені у критично низькій кількості (менше 20 тестів), тому для них не були створені окремі класифікатори, ці дані було об'єднано у категорію «Інші прийоми пропаганди», однак таким чином, щоб у наявному наборі не були присутні інші прийоми, відмінні від п'яти перерахованих. До прийо-

мів пропаганди, що представлені менш ніж у 100 документах, однак більше ніж 20 було застосовано SMOTE-балансування [12] під час навчання класифікаторів. До таких категорій належать: «Appeal to Authority», «Black and White Fallacy», «Reductio ad hitlerum», «Red Herring», «Slogans», «Thought terminating Cliches» та «Whataboutism».

Із розглянутого набору даних для кожної з 17 типових моделей машинного навчання було сфор-

мовано власний дочірній набір текстів, що має тексти з визначеним прийомом пропаганди та у протиположності використовує набір «Інші прийоми пропаганди», доповнений текстами без пропаганди та текстами з іншими прийомами пропаганди. Наприклад, при формуванні набору даних для виявлення прийому «Appeal to fear-prejudice» використовувались 153 документи цільової категорії з цим прийомом і 155 документів нецільової категорії, до якої було віднесено тексти, що містять: інші прийоми пропаганди (15%), «Appeal to Authority» (5%), «Black and White Fallacy» (5%), «Causal Oversimplification» (5%), «Doubt» (5%), «Exaggeration» (5%), «Flag-Waving» (5%), «Labeling» (5%), «Loaded Language» (5%), «Minimisation» (5%), «Name Calling» (5%), «Reductio ad hitlerum» (5%), «Red Herring» (5%), «Repetition» (5%), «Slogans» (5%), «Whataboutism» (5%), «Thought terminating Cliches» (5%), тексти без пропаганди (5%).

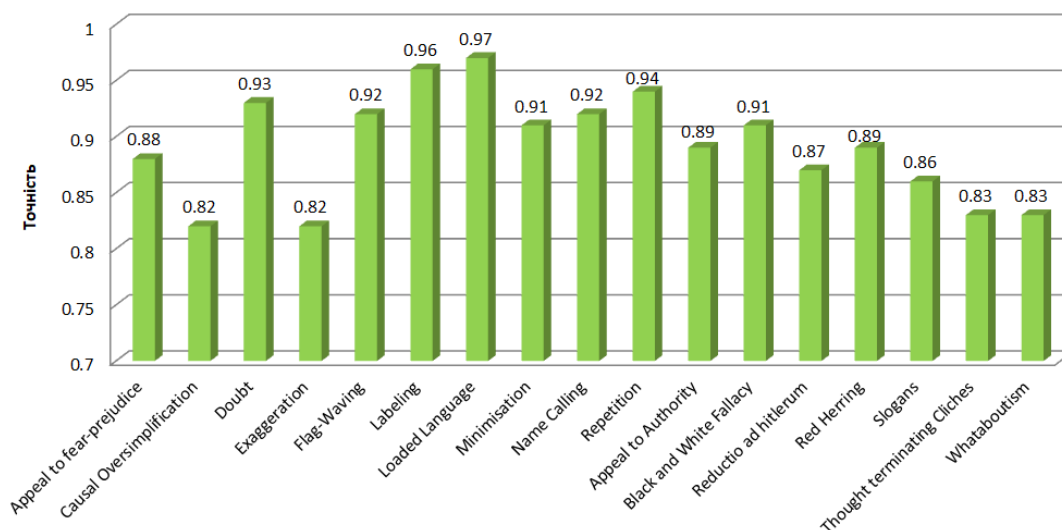
Отож у дослідженні буде використано 18 класів: 17 цільових, що є репрезентативними по кількості та відповідають 17 визначеним прийомам пропаганди та 5 об'єднаних в категорію «Інші прийоми пропаганди».

**Результати та обговорення.** За проведенням експериментом по навченим нейромережовим моделям машинного навчання вдалось досягнути точності виявлення проявів прийомів пропаганди від 0.82 до 0.97 (рис. 6).

Отримані результати забезпечили виявлення різних пропагандистських прийомів з мінімальною точністю 81,87% (мінімальні значення точності отримані для прийому «Causal Oversimplification»), що краще за відомі аналоги

[4] щодо виявлення пропаганди незалежно від використовуваних прийомів.

Порівняно з відомими аналогами [5] підвищилась точність виявлення різних пропагандистських прийомів: для прийому «Appeal to Authority» точність виявлення зросла на 10.76% (існуючий метод 77.27%, розроблений метод 88.03%); для прийому «Causal Oversimplification» точність виявлення зросла на 11.99% (існуючий метод 70.1%, розроблений метод 82.09%); для прийому «Doubt» точність виявлення зросла на 75.32% (існуючий метод 17.78%, розроблений метод 93.1%); для прийому «Exaggeration» точність виявлення зросла на 28.04% (існуючий метод 54.17%, розроблений метод 82.21%); для прийому «Flag-Waving» точність виявлення зросла на 27.65% (існуючий метод 64.52%, розроблений метод 92.17%); для прийому «Labeling» точність виявлення зросла на 48.57% (існуючий метод 47.43%, розроблений метод 96.0%); для прийому «Loaded Language» точність виявлення зросла на 42.9% (існуючий метод 54.17%, розроблений метод 97.07%); для прийому «Name Calling» точність виявлення зросла на 44.6% (існуючий метод 47.43%, розроблений метод 92.03%); для прийому «Repetition» точність виявлення зросла на 58.11% (існуючий метод 35.98%, розроблений метод 94.09%); для прийому «Appeal to Authority» точність виявлення зросла на 11.84% (існуючий метод 77.18%, розроблений метод 89.02%); для прийому «Black and White Fallacy» точність виявлення зросла на 36.68% (існуючий метод 54.55%, розроблений метод 91.23%); для прийому «Reductio ad hitlerum» точність виявлення зросла на 62.31% (існуючий метод 25.0%, розробле-



**Рис. 6. Точність виявлення прийомів пропаганди BERT-моделями, навченими запропонованим методом**

ний метод 87.31%); для прийому «Red Herring» точність виявлення зросла на 49.8% (існуючий метод 39.22%, розроблений метод 89.02%); для прийому «Slogans» точність виявлення зросла на 10.54% (існуючий метод 75.5%, розроблений метод 86.04%); для прийому «Thought terminating Cliches» точність виявлення зросла на 29.5% (існуючий метод 53.57%, розроблений метод 83.07%); для прийому «Whataboutism» точність виявлення зросла на 43.91% (існуючий метод 39.22%, розроблений метод 83.13%).

Отримані результати свідчать про спроможність запропонованого методу ефективно виявляти прийоми пропаганди, а також дозволяє візуально оцінити, які саме дані вплинули на рішення моделей щодо наявних прийомів пропаганди у користувацькому тексті.

Приклад поясненості з використанням моделі LIME щодо наявності у тексті прийому «Appeal to Fear-Prejudice» наведено на рис. 7.

Суть прийому «Appeal to Fear-Prejudice» полягає у створенні або підсиленні відчуття загрози та страху, з метою змусити людей прийняти певні ідеї або дії, які вважаються захисними або необхідними для уникнення небезпеки. Як видно з рис. 7, вагомими словами, що вплинули на рішення моделі, що тут присутній прийом «Appeal to Fear-Prejudice», є такі слова: «захопити», «знищити», «майбутнє», «варварів» тощо, що цілком відповідає визначенню даного прийому.

Отже, запропонований метод виявлення прийомів пропаганди за маркерами з візуальною інтерпретацією прийнятих рішень, що ґрунтується на використанні набору моделей машинного навчання окремих для кожного прийому пропаганди, що навчаються на модифікованих розмічених даних з доповненою множиною маркерів дозволяє виявляти прийоми пропаганди з точністю понад 81.87 %, що зважаючи на здатність пропаганди маскуватись у контекстах повідомлень та новин є високим показником.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розширення датасету, а також на розширення множини маркерів та навчання відповідних моделей машинного навчання.

**Висновки.** У статті розглянуто поточний стан наукового напрямку виявлення прийомів пропаганди. З огляду на невирішені задачі предметної області запропоновано метод нейромережевого виявлення прийомів пропаганди за маркерами з візуальною інтерпретацією прийнятих рішень, який дозволяє шляхом використання набору з 17 навчених BERT-моделей виявляти 17 відповідних прийомів пропаганди. Метод відрізняється від існуючих тим, що враховує при навчанні нейромережевих класифікаторів додаткову множину маркерів та дозволяє здійснювати візуальну інтерпретацію отриманих результатів. Під додатковою множиною маркерів мається на увазі використання різноманітних текстових ознак, які притаманні визначеним прийомам пропаганди. Крокami методу є попередня обробка усіх навчальних і тестових текстових даних, навчання нейромережевих моделей для ідентифікації кожного маркера пропаганди, навчання нейромережевих моделей для кожного прийому пропаганди, створення моделі для поясненості та інтерпретації отриманих прогнозів для кожної моделі виявлення прийомів пропаганди, нейромережева оцінка сили прояву прийомів пропаганди у тестовому тексті та інтерпретація значень моделлю LIME. У методі використано 17 нейромережевих моделей для виявлення прийомів пропаганди: «Appeal to fear-prejudice», «Causal Oversimplification», «Doubt», «Exaggeration», «Flag-Waving», «Labeling», «Loaded Language», «Minimisation», «Name Calling», «Repetition», «Appeal to Authority», «Black and White Fallacy», «Reductio ad hitlerum», «Red Herring», «Slogans», «Thought terminating Cliches» та «Whataboutism».

Для дослідження ефективності методу виявлення прийомів пропаганди було створено програмну реалізацію у вигляді набору ноутбуків реалізованих у хмарному сервісі «Google Colab», що призначені для навчання нейромережевих моделей BERT із подальшим збереженням їх на жорсткому диску для використання у вебзастосунку для виявлення прийомів пропаганди, а також набору ноутбуків для збереження нейромережевих моделей для виявлення сили прояву маркерів пропаганди. Створений вебзастосунок доз-

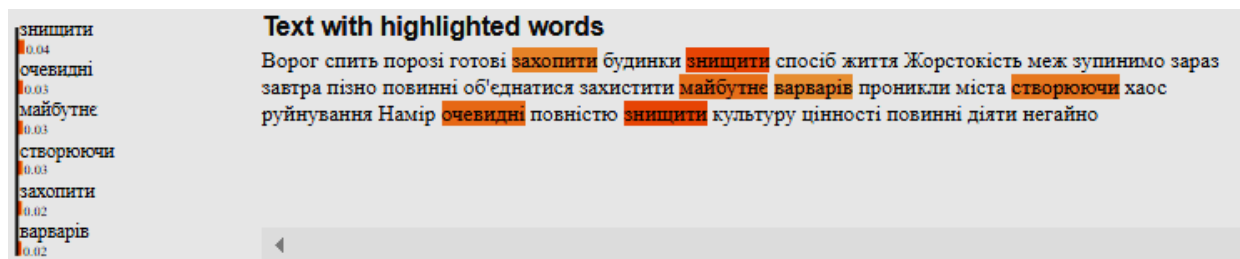


Рис. 7. Приклад пояснення результатів щодо наявності у тексті прийому «Appeal to Fear-Prejudice»



воляє не лише визначити інтенсивність проявів прийомів пропаганди, а і дає можливість здійснювати візуальну аналітику отриманих результатів. Для навчання BERT-моделей, що виконують функції виявлення прийомів пропаганди, використано набір даних «emnlp\_trans\_uk\_dataset» від «Analysis Project». Набір даних є корпусом із

550 новинних статей, анотованих вручну на рівні фрагментів за допомогою вісімнадцяти пропагандистських прийомів. Дослідження ефективності встановило, що розроблений метод дозволяє шляхом використання набору з 17 навчених BERT-моделей виявляти 17 відповідних прийомів пропаганди з точністю не нижче 81.87%.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Horak A., Sabol R., Herman O., Baisa, V. Recognition of propaganda techniques in newspaper texts: Fusion of content and style analysis. *Expert Systems with Applications*. 2024, Vol. 251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124085>.
2. Faye G., Icard B., Casanova M., Chanson J., Maine F., Bancilhon F., Gadek G., Gravier G., Egre P. Exposing propaganda: an analysis of stylistic cues comparing human annotations and machine classification. *Proceedings of the Third Workshop on Understanding Implicit and Underspecified Language*, 2024. pp. 62–72. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.03780>.
3. Vijayaraghavan P., Vosoughi, S. TWEETSPIN: Fine-grained Propaganda Detection in Social Media Using Multi-View Representations. *Proceedings of the 2022 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*. 2022, pp. 3433–3448.
4. Martino G., Yu S., Barron-Cedeno A., Petrov R., Nakov, P. Fine-Grained Analysis of Propaganda in News Article. *Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and the 9th International Joint Conference on Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP)*, 2019. pp. 5640–5650. DOI: <https://doi.org/10.18653/v1/D19-1565>.
5. Martino G. D. S., Barron-Cedeno A., Wachsmuth H., Petrov R., Nakov P. SemEval-2020 Task 11: Detection of Propaganda Techniques in News Articles. *Proceedings of the Fourteenth Workshop on Semantic Evaluation*. 2020, pp. 1377–1414.
6. Молчанова М. Метод виявлення та класифікації прийомів пропаганди у текстовому контенті засобами штучного інтелекту. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи та технології ІУСТ-ОДЕСА-2024»*. 2024. С. 251–254.
7. Krak I., Zalutka O., Molchanova M., Mazurets O., Bahrii R., Sobko O., Barmak O. Abusive Speech Detection Method for Ukrainian Language Used Recurrent Neural Network. *CEUR Workshop Proceedings*. 2024, Vol. 3688, pp. 16–28.
8. Hugging Face, The AI community building the future, 2024. URL: <https://huggingface.co/> (дата звернення: 06.11.2024).
9. Kaggle Competition – Disinformation Detection Challenge, 2023. URL: <https://aihouse.org.ua/en/event/disinformation-detection-challenge/> (дата звернення: 06.11.2024).
10. Propaganda Analysis Project, 2023. URL: <https://propaganda.math.unipd.it/index.html> (дата звернення: 06.11.2024).
11. Zenodo. Propaganda. Propopy Corpus 1.0, 2019. URL: <https://zenodo.org/records/3271522#.XS6qRUUzau4> (дата звернення: 06.11.2024).
12. Молчанова М. О. Застосування аугментації даних для підвищення точності виявлення пропаганди в інтернет-джерелах неймережевими моделями глибокого навчання. *Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи сучасної науки: теорія і практика»*. 2024, С. 199–205.

#### REFERENCES

1. Horak A., Sabol R., Herman O., Baisa, V. (2024) Recognition of propaganda techniques in newspaper texts: Fusion of content and style analysis. *Expert Systems with Applications*. Vol. 251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124085>
2. Faye G., Icard B., Casanova M., Chanson J., Maine F., Bancilhon F., Gadek G., Gravier G., Egre P. (2024) Exposing propaganda: an analysis of stylistic cues comparing human annotations and machine classification. *Proceedings of the Third Workshop on Understanding Implicit and Underspecified Language*, pp. 62–72. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.03780>
3. Vijayaraghavan P., Vosoughi, S. (2022) TWEETSPIN: Fine-grained Propaganda Detection in Social Media Using Multi-View Representations. *Proceedings of the 2022 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies*. pp. 3433–3448.

4. Martino G., Yu S., Barron-Cedeno A., Petrov R., Nakov, P. (2019) Fine-Grained Analysis of Propaganda in News Article. *Proceedings of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and the 9th International Joint Conference on Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP)*. pp. 5640–5650. DOI: <https://doi.org/10.18653/v1/D19-1565>
5. Martino G. D. S., Barron-Cedeno A., Wachsmuth H., Petrov R., Nakov P. (2020) SemEval-2020 Task 11: Detection of Propaganda Techniques in News Articles. *Proceedings of the Fourteenth Workshop on Semantic Evaluation*. pp. 1377–1414.
6. Molchanova, M. (2024) Method vyivlennia ta klasyfikatsii pryiomiv prohandy u tekstovomu kontenti zasobamy shtuchnoho intelektu. *Materialy XII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Informatsiini upravliaiuchi systemy ta tekhnologii IUST-ODESA-2024"*, S. 251–254. (in Ukrainian)
7. Krak I., Zalutska O., Molchanova M., Mazurets O., Bahrii R., Sobko O., Barmak O. (2024) Abusive Speech Detection Method for Ukrainian Language Used Recurrent Neural Network. *CEUR Workshop Proceedings*. Vol. 3688, pp. 16–28.
8. Hugging Face, The AI community building the future, 2024. URL: <https://huggingface.co/> (дата звернення: 06.11.2024).
9. Kaggle Competition – Disinformation Detection Challenge, 2023. URL: <https://aihouse.org.ua/en/event/disinformation-detection-challenge/> (дата звернення: 06.11.2024).
10. Propaganda Analysis Project, 2023. URL: <https://propaganda.math.unipd.it/index.html> (дата звернення: 06.11.2024).
11. Zenodo. Propaganda. Propopy Corpus 1.0, 2019. URL: <https://zenodo.org/records/3271522#.XS6qRUUzau4> (дата звернення: 06.11.2024).
12. Molchanova, M. O. (2024) Zastosuvannia auhmentatsii danykh dlia pidvyshchennia tochnosti vyivlennia prohandy v internet-dzherelakh neiromerezhevymy modeliamy hlybokoho navchannia. *Materialy VIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Perspektyvy suchasnoi nauky: teoriia i praktyka"*. S. 199–205. (in Ukrainian)

УДК 004.8  
DOI <https://doi.org/10.26661/2786-6254-2024-2-09>

## МЕТОД АНАЛІЗУ ТА ФОРМУВАННЯ РЕПРЕЗЕНТАТИВНИХ ВИБІРОК ТЕКСТОВИХ ДАНИХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

**Собко О. В.**

*викладач кафедри комп'ютерних наук  
Хмельницький національний університет  
вул. Інститутська, 11, Хмельницький, Україна  
[orcid.org/0000-0001-5371-5788](https://orcid.org/0000-0001-5371-5788)  
[olena.sobko.ua@gmail.com](mailto:olena.sobko.ua@gmail.com)*

**Бармак О. В.**

*доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри комп'ютерних наук  
Хмельницький національний університет  
вул. Інститутська, 11, Хмельницький, Україна  
[orcid.org/0000-0003-0739-9678](https://orcid.org/0000-0003-0739-9678)  
[alexander.barmak@gmail.com](mailto:alexander.barmak@gmail.com)*

**Ключові слова:** *NLP, етична коректність даних, етичні принципи, недискримінація, репрезентативність текстових наборів даних.*

Розроблено метод аналізу та формування репрезентативних вибірок текстових даних, призначений для аналізу та формування репрезентативних текстових вибірок даних за принципом справедливості FATE для предметних областей. Метод виконує аналіз репрезентативності вибірки даних за етичними аспектами, за результатом чого виконується репрезентативне коригування датасету за етичними аспектами. При коригуванні датасету відбувається вирішення оптимізаційної задачі як для вибору надлишкових елементів для видалення, так і для формування вимог щодо приналежності за етичними аспектами до кожного елементу для аугментації даних.

Для дослідження ефективності методу аналізу та формування репрезентативного подання текстового датасету було створено програмне забезпечення, яке використовує моделі машинного навчання для класифікації текстів за різними етичними аспектами – віку, гендеру, релігії, етнічності тощо. Для класифікації текстових зразків за етичними аспектами у вибірці було використано моделі машинного навчання: за віковим етичним аспектом SVM, гендерним – LSTM, релігійним – BERT, які кращі показники статистичних метрик. В результаті практичного застосування розробленого методу тестовий нерепрезентативний порівняно з об'єктивними даними демографічної статистики датасет було трансформовано у репрезентативний за віковим та гендерним етичними аспектами. Одержані відхилення розподілів зразків за класами етичних аспектів датасету, трансформованого за створеним методом, від ідеального репрезентативного розподілу склали: мінімальне – 0.00%, максимальне – 0.04%, середнє – 0.02%, за умов початкового обсягу датасету 47 692 елементів, мінімальної початкової кількості зразків у класі 1007 елементів, максимальної початкової кількості зразків у класі 28 112 елементів. Досліджена ефективність доводить, що розроблений метод дозволяє виконувати аналіз репрезентативності текстових датасетів та приведення їх до репрезентативного вигляду за різними аспектами принципу справедливості FATE.

## METHOD OF ANALYSIS AND FORMATION OF REPRESENTATIVE SETS OF TEXT DATA USING MACHINE LEARNING MODELS

**Sobko O. V.**

*Lecturer at the Department of Computer Sciences  
Khmelnyskyi National University  
Institutska str., 11, Khmelnytskyi, Ukraine  
orcid.org/0000-0001-5371-5788  
olena.sobko.ua@gmail.com*

**Barmak O. V.**

*Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
Head of the Department of Computer Sciences  
Khmelnyskyi National University  
Institutska str., 11, Khmelnytskyi, Ukraine  
orcid.org/0000-0003-0739-9678  
alexander.barmak@gmail.com*

**Key words:** *NLP, data ethical correctness, ethical principles, non-discrimination, text datasets representative.*

The method of analysis and formation of representative sets of text data using machine learning models was developed, intended for analysis and formation of representative text samples of data according to the principle of fairness of FATE for subject areas. The method performs an analysis of representativeness of data sample according to ethical aspects, as result of which a representative adjustment of the dataset according to ethical aspects is performed. When adjusting the dataset, the optimization problem is solved both for the selection of redundant elements for removal, and for formation of requirements for ethical aspects of belonging to each element for data augmentation.

To investigate the effectiveness of analysis method and the formation of a representative presentation of the text dataset, software was created that uses machine learning models to classify texts according to various ethical aspects - age, gender, religion, ethnicity, etc. Machine learning models were used to classify text samples by ethical aspects in the sample: by age ethical aspect SVM, gender – LSTM, religious – BERT, which are the best indicators of statistical metrics. As a result of the practical application of the developed method, the test dataset, unrepresentative compared to the objective data of demographic statistics, was transformed into a representative one in terms of age and gender ethical aspects. The obtained deviations of the sample distributions by classes of ethical aspects of the dataset transformed according to the created method from the ideal representative distribution were: minimum 0.00%, maximum 0.04%, average 0.02%, under the conditions of the initial volume of the dataset 47,692 elements, the minimum initial number of samples in the class 1007 elements, the maximum initial number of samples in the class is 28,112 elements. The studied efficiency proves that developed method allows performing the analysis of the representativeness of text datasets and bringing them to a representative look according to various aspects of FATE principle of justice.

---

**Вступ.** У сучасному світі активно розробляються численні рішення з використанням штучного інтелекту, покликані вирішувати різноманітні завдання, з якими люди стикаються щодня. Відповідно, результати, що генеруються штучним інтелектом, залежать від навчальних датасетів, на яких вони навчалися, іншими словами – вміст цих датасетів безпосередньо впливає на кінцевий результат. Відсутність прозорості щодо джерел і характеристик даних, які використовуються для навчання алгоритмів штучного інтелекту, зменшує довіру до отриманих результатів. В такому випадку часто користувачі не можуть оцінити потенційні упередження чи дискримінаційні елементи, вбудовані у ці алгоритми. Недостатня інформованість про вміст навчальних датасетів збільшує ризик поширення несправедливих або неточних рішень, які можуть мати серйозні наслідки для окремих осіб та суспільства в цілому [1].

Засоби для оцінювання репрезентативності текстового набору даних відповідно до принципів етичної недискримінації є наразі відсутніми. Відомі датасети для навчання нейромереж, наприклад [2] та [3], активно використовуються дослідниками, адже мають великий обсяг даних, проте вони не валідувались авторами щодо репрезентативності за принципом справедливості, а отже, використання таких датасетів для навчання алгоритмів штучного інтелекту можуть потенційно порушувати етичні принципи та, звідси, мати низьку достовірність прийнятих рішень.

Репрезентативність даних у датасетах не лише впливає на точність результатів та моделей, але й тісно пов'язана з принципами FATE (Fairness, Accountability, Transparency, Ethics) у використанні даних і розробці технологій штучного інтелекту. Якщо датасет не включає належного представлення всіх соціальних, демографічних або культурних груп, це може призвести до дискримінаційних моделей, які надають пріоритет одній групі над іншою, тобто не є справедливими. Репрезентативність датасетів за етичним принципом FATE може бути досягнута шляхом коректного балансування за різними етичними аспектами: расового, гендерного, релігійного, вікового тощо [4].

Основним внеском статті є розробка й апробація підходу до аналізу та формування репрезентативних текстових вибірок даних за принципом справедливості FATE для предметних областей.

**Огляд літератури.** Дослідженню репрезентативності текстових вибірок та справедливому і неупередженому представленню демографічних груп у них присвячено багато робіт, оскільки поняття репрезентативності, справедливості та неупередженості є важливими у створенні етичних і справедливих моделей машинного навчання [5].

Так, у [6] автори піднімають важливу проблему репрезентативності вибірок у контексті машинного навчання та штучного інтелекту, акцентуючи увагу на необхідності точного відображення популяційних даних. Основною стратегією, яку автори пропонують для досягнення високої якості моделей, є використання стратифікованих вибірок, що дозволяють зменшити варіативність між підгрупами та точно відобразити пропорції між різними категоріями у популяції.

Автори [7] розглядають упередження, що виникають як через дисбаланс класів у даних, так і через чутливі (захищені) ознаки, такі як раса чи стать. Автори пропонують новий метод, Fair Oversampling, який поєднує популярний метод для роботи з дисбалансом даних SMOTE із модифікаціями, що допомагають знизити вплив чутливих ознак. Підхід збільшує точність моделі за рахунок балансування класів і зменшує залежність від чутливих ознак, що покращує групову справедливість.

У [8] розглядається проблема гендерної упередженості в моделях обробки природної мови, вирішуючи її за допомогою двох основних підходів: статистичного та каузального забезпечення справедливості. Дослідники застосовують такі техніки, як counterfactual data augmentation для каузального дебіасингу, а також методи ресемплінгу та ревагінгу для статистичного дебіасингу. Результати показали, що поєднання цих технік дозволяє значно упередження у моделях як за статистичними, так і за каузальними метриками.

У наведених роботах показано, що формування репрезентативних та неупереджених вибірок є актуальним напрямком дослідження, проте більшість робіт присвячено або виявленню неупередженості, або аналізу репрезентативності або неупередженості вибірок даних, однак вибірки даних повинні бути модифіковані для досягнення відповідності FATE-принципам [9]. Узагальнюючи, можна виділити особливості сучасного підходу, який застосовується до розробки моделей ШІ (Рис.1). Однак такий підхід не враховує існуючі етичні принципи та недискримінаційне, репрезентативне подання існуючих підгруп популяції, які повинні застосовуватись для отримання моделей ШІ.

**Метою роботи** є забезпечення дотримання етичних аспектів (гендерного, релігійного, вікового тощо) принципу справедливості FATE [4] для навчальних датасетів, яке полягає у створенні методу аналізу та формування репрезентативних (за означеними аспектами) текстових вибірок даних.

Для досягнення означеної мети, потрібно запропонувати метод, який реалізовуватиме наступні завдання дослідження:

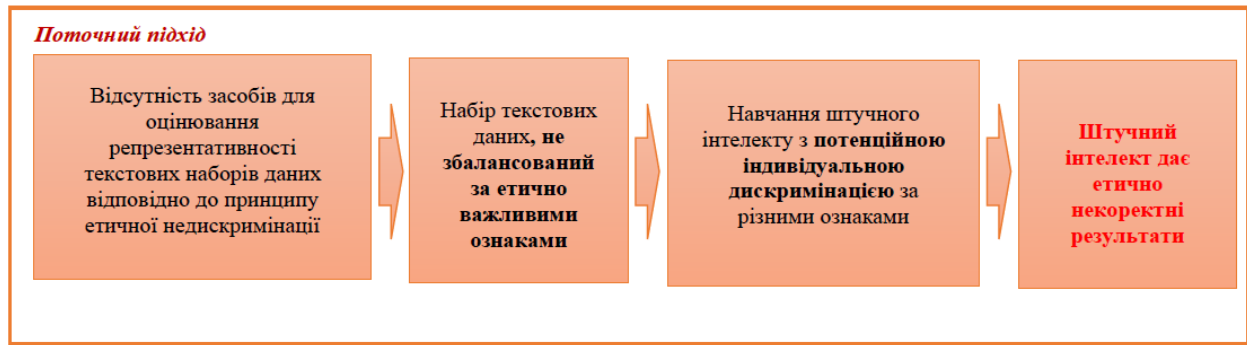


Рис. 1. Існуючий підхід до навчання моделей ШІ

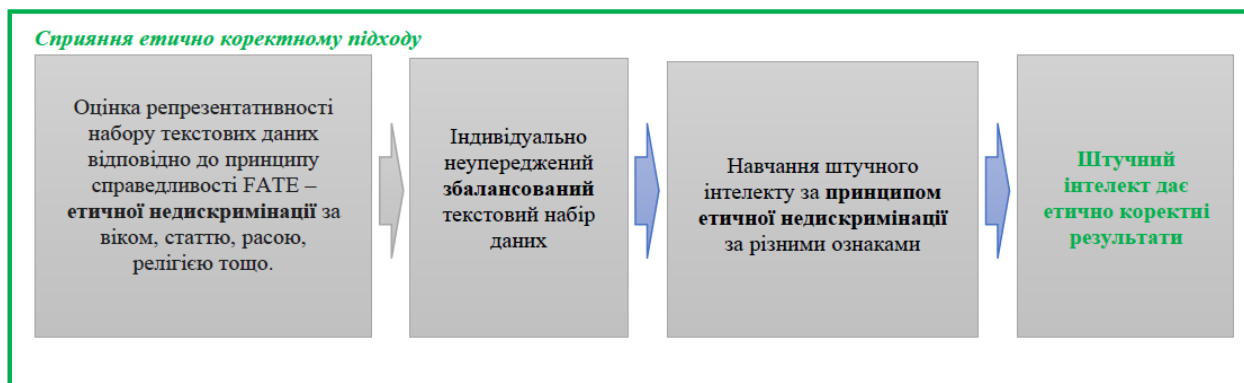


Рис. 2. Запропонований підхід до формування репрезентативних за етичними принципами датасетів

1) розробити підхід до аналізу та формування відповідних репрезентативних датасетів за принципом справедливості FATE для предметних областей;

2) дослідити ефективність запропонованого підходу, шляхом використання його для прикладного аналізу текстового датасету та приведення його до репрезентативного вигляду за аспектами принципу справедливості FATE: гендеру, віку й релігії.

Метод аналізу та формування репрезентативних вибірок текстових даних. На протизагу існуючому підходу до навчання моделей ШІ (див. Рис. 1) у дослідженні запропоновано новий підхід (Рис. 2), який забезпечить репрезентативність та етичну коректність датасетів, які використовуються для навчання моделей ШІ.

Проблему одержання репрезентативного, неупередженого за етичними принципами текстового датасету можна подати у рамках інформаційної моделі наступного вигляду:

$$\{D, D', C, A, M, F\}, \quad (1)$$

де  $D$  – текстовий датасет для аналізу та коригування,  $D'$  – текстовий датасет після коригування,  $C$  – множина класів предметної області датасету (наприклад, види кібербулінгу),  $A$  – множина

етичних аспектів,  $M$  – множина навчених моделей машинного навчання (окрема для кожного етичного аспекту),  $F$  – цільова функція мінімізації відхилення між поточними та бажаними співвідношеннями для всіх етичних аспектів.

У дослідженні пропонується звести задачу побудови репрезентативного, неупередженого за етичними принципами датасету до задачі багатокритеріальної оптимізації. Задача оптимізації полягає у мінімізації відхилення між поточними та бажаними співвідношеннями класів, враховуючи обмеження на кількість зразків у класах і можливостей генерації синтетичних даних.

Вхідні дані: текстовий датасет  $D$ , множина етичних аспектів  $A$ , вимоги до репрезентативного розподілу  $D'$ .

Мета задачі: створення репрезентативної вибірки за всіма етичними аспектами, яка досягає цільових пропорцій класів для кожного етичного аспекту  $D \Rightarrow D'$ .

Змінні:  $x_{ij}$  – кількість зразків класу  $C_j$  в аспекті  $A_i$  після секвестрування та аугментації.

Цільовою функцією  $F$  є мінімізація відхилення між поточними та бажаними співвідношеннями для всіх етичних аспектів одночасно з урахуванням обмежень (3) – (6):

$$F = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \left| \frac{x_{ij}}{n'} - T_{ij} \right|. \quad (2)$$

Обмеження задачі:

1) сума всіх зразків класів в межах одного аспекту дорівнює цільовій кількості зразків для цього аспекту (4):

$$\sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} = n', \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (3)$$

де  $n_i$  – кількість класів в аспекті  $A_i$ ;

2) кількість зразків для кожного класу повинна відповідати цільовій пропорції класів:

$$\frac{x_{ij}}{n'} \approx T_{ij}, \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}, \forall j \in \{1, 2, \dots, n_i\}; \quad (4)$$

3) розрахункова кількість зразків не може бути від'ємною:

$$x_{ij} \geq 0, \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}, \forall j \in \{1, 2, \dots, n_i\}; \quad (5)$$

4) можливість додавання нових зразків повинна відповідати можливостям генерації нових даних для кожного класу та аспекту:

$$x_{ij} \leq g_{ij}, \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}, \forall j \in \{1, 2, \dots, n_i\}, \quad (6)$$

де  $g_{ij}$  – максимально можлива кількість зразків класу  $C_j$  в аспекті  $A_i$ , яку можна додати.

Виходячи з поставленої оптимізаційної задачі формування репрезентативного датасету (2), наведемо кроки методу аналізу та формування репрезентативних вибірок текстових даних.

Метод аналізу та формування репрезентативних вибірок текстових даних із використанням моделей машинного навчання подаємо у вигляді трьох послідовних етапів: перевірки коректності елементів датасету, аналізу репрезентативності за етичними аспектами та репрезентативне коригування датасету. Кожен етап складається з своїх кроків, які наведено на рисунку 3.

Вхідними даними методу є текстовий датасет для аналізу та коригування  $D$ , множина етичних аспектів  $A$ , множина навчених моделей ML  $M$  для етичних аспектів  $A$ , вимоги до датасету  $D'$  (обсяг, пропорції за етичними аспектами).

На етапі 1 здійснюється перевірка коректності елементів датасету, а саме першим кроком видалення неінформативних фрагментів елементів та другим кроком видалення некоректних елементів у  $D$ .

На 2 етапі відбувається аналіз репрезентативності за етичними аспектами. На першому кроці цього етапу відбувається векторизація кожного  $\forall d \in D$  за кожною з моделей  $\forall m \in M$ . На

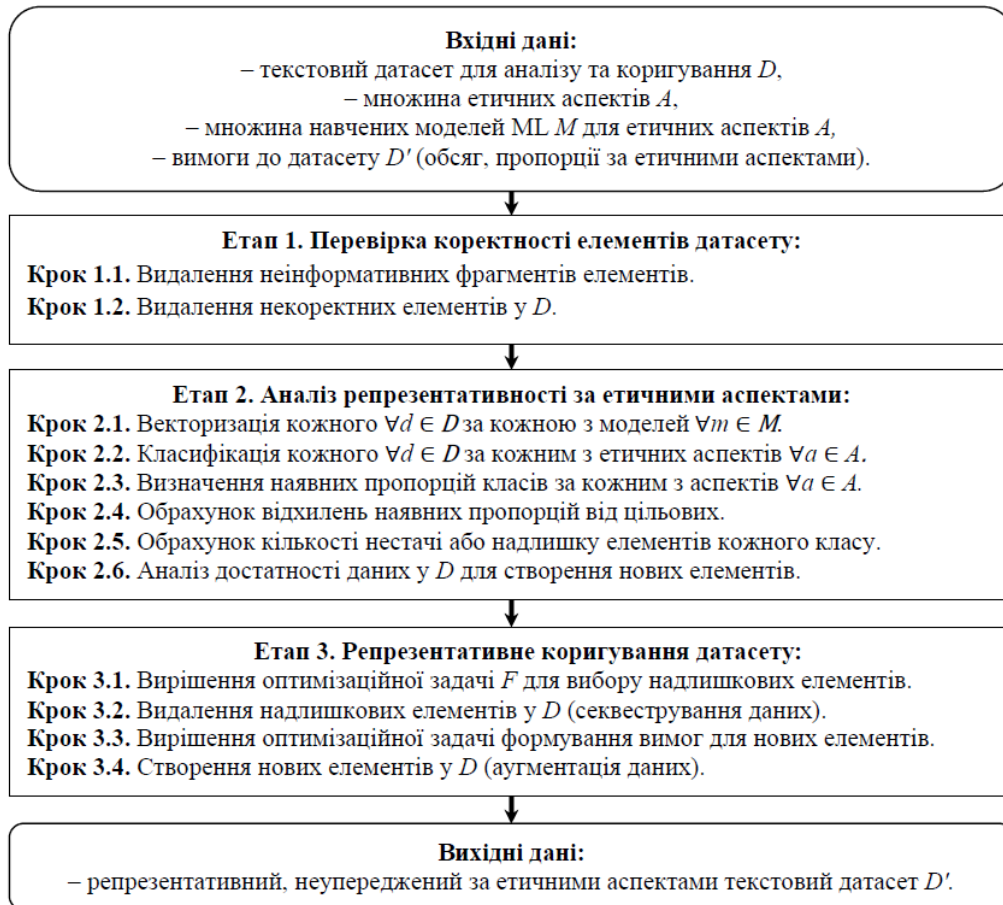


Рис. 3. Кроки of method for analysis and formation of representative text datasets

другому кроці класифікація кожного  $\forall d \in D$  за кожним з етичних аспектів  $\forall a \in A$ . На третьому кроці визначаються наявні пропорції класів за кожним із аспектів  $\forall a \in A$ . Далі на кроці чотири обраховуються відхилення наявних пропорцій від цільових, а також на п'ятому кроці обраховуються кількість нестачі або надлишку елементів кожного класу. Завершальним на цьому етапі є крок 6, на якому аналізується достатність даних у  $D$  для створення нових елементів.

Крок 3 передбачає репрезентативне коригування вибірки даних з урахуванням етичних аспектів. Коригуванням є видалення та додавання.

Операція секвестрування виконується для видалення надлишкових елементів кожного класу за кожним з етичних аспектів з мінімальною шкодою для інших розподілів, для чого вирішується оптимізаційна задача вибору надлишкових елементів в рамках (2), які мають бути видалені для досягнення цільових пропорцій класів.

Операція аугментації виконується для створення нових елементів за допомогою одного з відомих способів, наприклад за методикою SMOTE. Створюються вимоги в вигляді потрібної комбінації класів кожного з етичних аспектів для кожного нового елементу, для чого вирішується оптимізаційна задача формування вимог до відсутніх елементів в рамках (2).

Вихідними даними методу є репрезентативний, неупереджений за етичними аспектами текстовий датасет  $D'$ .

Виконання кроків методу аналізу та формування репрезентативних вибірок текстових даних дозволить формувати текстові вибірки, які є недискримінаційними та неупередженими та відображають пропорційне до реальних демографічних підгруп популяції представлення зразків вибірки, що впливатиме на точність та прозорість навчання моделей машинного навчання для вирішення різноманітних задач.

Для формування множини навчених моделей машинного навчання, які є окремими для кож-

ного етичного аспекту, необхідно навчити кожен модель класифікатора, що аналізуватиме репрезентативність вхідної текстової вибірки згідно кроку 2 на Рис. 3. Для отримання таких класифікаторів, що і будуть формувати множину навчених етичних моделей машинного навчання, необхідно виконати кроки, що подані на Рис 4.

Першим кроком є вибір моделі ML для класифікації текстів за етичними аспектами. Для таких цілей використовуються як моделі глибокого навчання, наприклад, BERT, GPT, LSTM, GRU, так і класифікатори, наприклад, Logistic Regression, Naive Bayes, Support Vector Machines k-Nearest Neighbors тощо. Після цього наступним кроком відбувається навчання класифікатора за вибраною моделлю ML на анованому датасеті для етичного аспекту.

Останнім кроком є аналіз якості отриманого класифікатора за статистичними показниками, такими як Accuracy, Precision, Recall та F1-score [10], якщо якість моделі згідно отриманих показників незадовільна, то необхідно повернутися до кроку вибору моделі ML, в іншому випадку – отримано класифікатор для аналізу датасету на репрезентативність за етичним аспектом, який розглядається.

Таким чином формується така кількість моделей машинного навчання для множини EML, яка відповідає кількості обраних етичних аспектів для аналізу та формування репрезентативної вибірки текстових даних.

Для апробації методу аналізу та формування репрезентативних вибірок текстових даних сформовано вхідний датасет на основі двох датасетів «Cyberbullying Classification» [2] та «Cyberbully Detection Dataset» [3]. Датасет «Cyberbullying Classification» містить 46017 твітів, які промарковані за видами кіберзалякувань на 6 класів. Датасет «Cyberbully Detection Dataset» містить 99989 твітів, який також промаркований за видами кіберзалякувань. Обидва датасети не містять міток щодо статі, вікової категорії, релігії та етнічності автора повідомлення.



Рис. 4. Кроки для отримання моделей класифікаторів ML для етичних аспектів



Для навчання моделей машинного навчання, які використовуватимуться для розмітки вхідного датасету використано датасети на прикладі трьох етичних аспектів принципу справедливості: гендеру [11] (34146 унікальних текстових записів), віку [12] (20109 унікальних текстових записів) та релігії [13] (21948 унікальних текстових записів). Так як класи в наведених датасетах не збалансовані та мають різну кількість зразків, що негативно впливатиме на якість навчання моделей машинного навчання, то усі класи у датасетах були збалансовані за кількістю. Остаточну кількість зразків у кожному класі навчальних вибірок для навчання EML за етичними аспектами показано на Рис. 5.

В результаті роботи зі створення навчальних вибірок, отримано збалансовані за кількістю текстових повідомлень у класах датасети. Такі датасети дозволять коректно оцінювати репрезентативність робочих текстових датасетів.

**Результати та обговорення.** Для аналізу та формування репрезентативної вибірки текстових даних за цільові пропорції класів для формування репрезентативної вибірки текстових даних за віком та статтю взято популяцію України. За даними Інституту демографії та соціальних досліджень імені М. В. Птухи Національної академії наук України ([https://idss.org.ua/forecasts/nation\\_por\\_proj](https://idss.org.ua/forecasts/nation_por_proj)), станом на липень 2023 року загальна чисельність населення України оцінюється в 35596216 осіб. У кожній віковій підгрупі представлено наступну кількість осіб: вікова група 0-19 років 6 659 068 осіб, 20-29 років 3 623 143 осіб, 30-39 років – 6 022 345 осіб, 40-49 років – 5 431 140 осіб, 50-100 років – 13 860 520 осіб. Щодо гендерної структури населення України на 2023 рік: 16951527 – жінки, а 18644689 – чоловіки (idss.org.ua). Зауважимо, що в межах цієї роботи при аналізі гендерного етичного аспекту розглядається цисгендерна група.

Для дослідження ефективності описаного в роботі методу аналізу та формування репрезентативної вибірки текстових даних навчено декілька моделей машинного навчання. Результати обчислення статичних метрик як Accuracy, Precision, Recall та F1-score [10] моделей машинного навчання для гендерного, вікового та релігійного етичних аспектів наведено в таблиці 1.

Для різних класів було отримано різні рівні лінійної роздільної здатності [14]: за релігійною ознакою з використанням класифікатора BERT, який показав найкращий результат з навчених

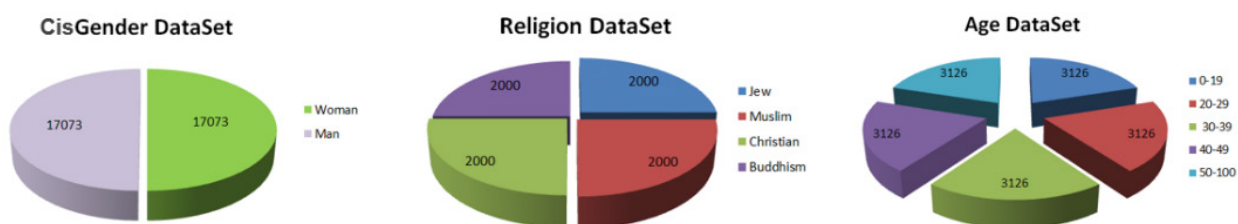


Рис. 5. Класи та кількість зразків у датасетах для навчання EML за етичними аспектами

Таблиця 1

Статистичні метрики Accuracy, Precision, Recall та F1-score моделей машинного навчання

Модель машинного навчання	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
<i>Гендерний етичний аспект</i>				
FastForest	0.630	0.640	0.600	0.620
SVM	0.580	0.580	0.580	0.580
LSTM	0.70	0.770	0.670	0.720
BERT	0.690	0.640	0.710	0.670
<i>Віковий етичний аспект</i>				
FastForest	0.535	0.542	0.504	0.504
SVM	0.815	0.770	0.779	0.770
LSTM	0.590	0.600	0.560	0.580
BERT	0.580	0.430	0.450	0.440
<i>Релігійний етичний аспект</i>				
FastForest	0.775	0.800	0.762	0.780
SVM	0.825	0.850	0.810	0.829
LSTM	0.850	0.880	0.830	0.854
BERT	0.910	0.980	0.74 0	0.840

моделей машинного навчання для задачі класифікації текстових зразків за релігійним етичним аспектом, дані виявились добре роздільні, за гендерною ознакою з використанням класифікатора LSTM, який показав найкращу ефективність порівняно з іншими моделями, дані виявились середньо роздільні та за віковою ознакою з використанням класифікатора SVM – погано роздільні [15].

Окрім того, виявлено що датасет не є репрезентативним, адже класи різних етичних аспектів мають кількість текстових зразків, що не відповідає пропорціям демографічних підгруп населення України, таким чином потребують збалансування для набуття репрезентативного вигляду. Тому, згідно з кроками методу аналізу та формування репрезентативних вибірок текстових даних, вибірка текстових даних потребує аугментації даних для формування репрезентативної вибірки. Для цього необхідно вирішити оптимізаційну задачу (2) для коректного видалення надлишкових елементів кожного класу за кожним з етичних аспектів з подальшою аугментацією вибірки даних до цільових вимог (кількість елементів та пропорції класів).

У таблиці 2 подано відсоткові відношення зразків за віком у вибірці текстових даних та осіб популяції у вікових демографічних підгрупах, а також обчислено новий розподіл класів вибірки, якби враховувався лише один етичний аспект – віковий.

Після трансформації датасету за розробленим методом одержано відхилення розподілів зразків за класами вікового етичного аспекту датасету, трансформованого за створеним методом, від ідеального репрезентативного розподілу склали: мінімальне – 0.01%, максимальне – 0.04%, середнє – 0.02%, а для гендерного етичного аспекту: мінімальне – 0.03%, максимальне – 0.03%, середнє – 0.03%.

Проте оптимізаційна задача з формування репрезентативної вибірки текстових даних є багатокритеріальна, критеріями в якій є формування

вибірки за віковим та гендерним етичним аспектом, тому метою є мінімізація відхилення між поточними та бажаними співвідношеннями класів, враховуючи обмеження на кількість зразків і можливості генерації нових даних. В результаті вирішення оптимізаційної задачі для формування репрезентативної вибірки за віковим та гендерним етичними аспектами на прикладі демографічних підгруп популяції України отримано шляхом аугментації репрезентативну вибірку текстових даних, баланс класів якої подано у таблиці 2.

Отримано відхилення розподілів зразків за класами вікового та гендерного етичних аспектів датасету одночасно, трансформованого за створеним методом, від ідеального репрезентативного розподілу склали: мінімальне 0.00%, максимальне 0.04%, середнє 0.02%.

Отже, в результаті виконання кроків методу аналізу та формування репрезентативних вибірок текстових даних сформовано датасет, який є недискримінаційним і неупередженим й відображає пропорційне до реальних демографічних підгруп популяції України представлення зразків вибірки.

**Висновки.** Було розроблено метод аналізу та формування репрезентативних вибірок текстових даних, призначений для аналізу та формування репрезентативних текстових вибірок даних за принципом справедливості FATE для предметних областей. Метод виконує аналіз репрезентативності вибірки даних за етичними аспектами, за результатом чого виконується репрезентативне коригування датасету за етичними аспектами. При коригуванні датасету відбувається вирішення оптимізаційної задачі як для вибору надлишкових елементів для видалення, так і для формування вимог щодо приналежності за етичними аспектами до кожного елементу для аугментації даних.

Для дослідження ефективності методу аналізу та формування репрезентативного подання текстового датасету було створено програмне забезпечення, яке використовує моделі машинного

Таблиця 2

**Розподіл зразків у сформованій репрезентативній вибірці після аугментації даних в результаті розв’язку багатокритеріальної оптимізаційної задачі**

Вікові демографічні підгрупи	0-19 років	20-29 років	30-39 років	40-49 років	50-100 років
<i>Відсоткове відношення демографічних груп за гендером та віком у популяції України</i>					
Чоловіки	9.67%	5.64%	8.96%	7.79%	15.56%
Жінки	9.04%	4.53%	7.96%	7.47%	23.38%
<i>Відсоткове відношення демографічних груп за гендером та віком у текстовій вибірці</i>					
Чоловіки	9.65%	5.62%	8.94%	7.80%	15.57%
Жінки	9.05%	4.57%	7.97%	7.45%	23.38%
<i>Одержане відхилення від репрезентативного розподілу</i>					
Чоловіки	0.02%	0.02%	0.02%	0.01%	0.02%
Жінки	0.01%	0.04%	0.01%	0.02%	0.00%

навчання для класифікації текстів за різними етичними аспектами – віку, гендеру, релігії, етнічності тощо. Так, для класифікації текстових зразків у вибірці за віковим етичним аспектом використано SVM, гендерним – LSTM, релігійним – BERT, які кращі показники статистичних метрик. В результаті практичного застосування розробленого методу було трансформовано датасет у репрезентативний за віковим та гендерним етичними аспектами. Одержані відхилення розподілів зразків за класами етичних аспектів датасету, трансформованого за створеним методом, від ідеального репрезентативного розподілу склали: мінімальне – 0.00%, максимальне – 0.04%, середнє – 0.02%. Досліджена

ефективність доводить, що розроблений метод дозволяє виконувати аналіз репрезентативності текстових датасетів та приведення їх до репрезентативного вигляду за різними аспектами принципу справедливості FATE.

Подальшими планами щодо покращення методу аналізу та формування репрезентативних вибірок текстових даних є формування не тільки недискримінаційної вибірки за кількістю зразків, а й пошук та видалення у вибірках текстових зразків, що містять упереджене ставлення до представників різних демографічних підгруп, відповідно до етичних аспектів FATE-принципу справедливості.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Shah M., Sureja N. A Comprehensive Review of Bias in Deep Learning Models: Methods, Impacts, and Future Directions. *Arch Computat Methods Eng.* 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10134-2>.
2. Kaggle.com. Cyberbullying Classification, 2021. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/andrewmvd/cyberbullying-classification?resource=download> (дата звернення: 26.10.2024).
3. Kaggle.com. CyberBullying Detection Dataset, 2024. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/sayankr007/cyber-bullying-data-for-multi-label-classification> (дата звернення: 26.10.2024).
4. Memarian B., Doleck T. Fairness, Accountability, Transparency, and Ethics (FATE) in Artificial Intelligence (AI) and Higher Education: A Systematic Review. *Computers and Education: Artificial Intelligence.* 2023, Vol. 5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100152>.
5. Manziuk E., Krak I., Barmak O., Mazurets O., Kuznetsov V., Pylypiak O. Structural Alignment Method of Conceptual Categories of Ontology and Formalized Domain. *CEUR Workshop Proceedings.* 2021, Vol. 3003, pp. 11–22.
6. Clemmensen L. K. H., Rune D. K. Data Representativity for Machine Learning and AI Systems. 2022. URL: <https://ar5iv.labs.arxiv.org/html/2203.04706> (дата звернення: 26.10.2024).
7. Dablain D., Krawczyk B., Chawla N. Towards a Holistic View of Bias in Machine Learning: Bridging Algorithmic Fairness and Imbalanced Learning. *Discov Data.* 2024, Vol. 2(4). DOI: <https://doi.org/10.1007/s44248-024-00007-1>.
8. Chen H., Ji Y., Evans D. Addressing Both Statistical and Causal Gender Fairness in NLP Models. *In Findings of the Association for Computational Linguistics: NAACL 2024.* 2024, pp. 561–582. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.00463>.
9. Молчанова М.О., Мазурець О.В., Собко О.В., Кліменко В.І., Андрощук В.І. Метод неймережевого виявлення кібербулінгу з використанням хмарних сервісів та об'єктно-орієнтованої моделі. *Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету», серія: Технічні науки.* 2024. № 2(333). С. 200–206. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-333-2-32>.
10. Rainio O., Teuvo J., Klén R. Evaluation Metrics and Statistical Tests for Machine Learning. *Scientific Reports.* 2024, Vol. 14(1). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56706-x>.
11. Kaggle.com. Tweet Files for Gender Guessing, 2019. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/aharless/tweet-files-for-gender-guessing> (дата звернення: 26.10.2024).
12. Kaggle.com. CyberBullying Detection Dataset, 2024. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/sayankr007/cyber-bullying-data-for-multi-label-classification> (дата звернення: 26.10.2024).
13. Live.european-language-grid.eu. TAG-it Dataset Distribution, 2024. URL: <https://live.european-language-grid.eu/catalogue/corpus/8112/download> (дата звернення: 26.10.2024).
14. Krak I., Zalutka O., Molchanova M., Mazurets O., Bahrii R., Sobko O., Barmak O. Abusive Speech Detection Method for Ukrainian Language Used Recurrent Neural Network. *CEUR Workshop Proceedings.* 2024. Vol. 3688, pp. 16–28.
15. Slobodzian V., Kovalchuk O., Molchanova M., Sobko O., Mazurets O., Barmak O., Krak I. Text Data Vectorization Model of Ukrainian-Language Internet Communication Content. *CEUR Workshop Proceedings.* 2022. Vol. 3171, pp. 561–571.

## REFERENCES

1. Shah M., Sureja N. A Comprehensive Review of Bias in Deep Learning Models: Methods, Impacts, and Future Directions. *Arch Computat Methods Eng.* 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10134-2>
2. Kaggle.com. Cyberbullying Classification, 2021. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/andrewmvd/cyberbullying-classification?resource=download> (accessed: 26.10.2024)
3. Kaggle.com. CyberBullying Detection Dataset, 2024. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/sayankr007/cyber-bullying-data-for-multi-label-classification> (accessed: 26.10.2024)
4. Memarian B., Doleck T. Fairness, Accountability, Transparency, and Ethics (FATE) in Artificial Intelligence (AI) and Higher Education: A Systematic Review. *Computers and Education: Artificial Intelligence.* 2023, Vol. 5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100152>
5. Manziuk E., Krak I., Barmak O., Mazurets O., Kuznetsov V., Pylypiak O. Structural Alignment Method of Conceptual Categories of Ontology and Formalized Domain. *CEUR Workshop Proceedings.* 2021, Vol. 3003, pp. 11–22.
6. Clemmensen L. K. H., Rune D. K. Data Representativity for Machine Learning and AI Systems. 2022. URL: <https://arxiv.labs.arxiv.org/html/2203.04706> (accessed: 26.10.2024)
7. Dablain D., Krawczyk B., Chawla N. Towards a Holistic View of Bias in Machine Learning: Bridging Algorithmic Fairness and Imbalanced Learning. *Discov Data.* 2024, Vol. 2(4). DOI: <https://doi.org/10.1007/s44248-024-00007-1>
8. Chen H., Ji Y., Evans D. Addressing Both Statistical and Causal Gender Fairness in NLP Models. In *Findings of the Association for Computational Linguistics: NAACL 2024.* 2024, pp. 561–582. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.00463>
9. Molchanova M.O., Mazurets O.V., Sobko O.V., Klimenko V.I., Androshchuk V.I. Metod neiromerezhevoho vyavleniia kiberbulinhu z vykorystanniam khmarnykh servisiv ta obiektno-orientovanoi modeli. *Naukovyi zhurnal «Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu», serii: Tekhnichni nauky.* 2024. №2 (333). S. 200–206. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-333-2-32>. (in Ukrainian)
10. Rainio O., Teuvo J., Klén R. Evaluation Metrics and Statistical Tests for Machine Learning. *Scientific Reports.* 2024, Vol. 14(1). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56706-x>
11. Kaggle.com. Tweet Files for Gender Guessing, 2019. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/aharless/tweet-files-for-gender-guessing> (accessed 26.10.2024)
12. Kaggle.com. CyberBullying Detection Dataset, 2024. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/sayankr007/cyber-bullying-data-for-multi-label-classification> (accessed: 26.10.2024)
13. Live.european-language-grid.eu. TAG-it Dataset Distribution, 2024. URL: <https://live.european-language-grid.eu/catalogue/corpus/8112/download> (accessed: 26.10.2024)
14. Krak I., Zalutska O., Molchanova M., Mazurets O., Bahrii R., Sobko O., Barmak O. Abusive Speech Detection Method for Ukrainian Language Used Recurrent Neural Network. *CEUR Workshop Proceedings.* 2024. Vol. 3688, pp. 16–28.
15. Slobodzian V., Kovalchuk O., Molchanova M., Sobko O., Mazurets O., Barmak O., Krak I. Text Data Vectorization Model of Ukrainian-Language Internet Communication Content. *CEUR Workshop Proceedings.* 2022. Vol. 3171, pp. 561–571.

УДК 004.94:378.147.6

DOI <https://doi.org/10.26661/2786-6254-2024-2-10>

## АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО СТВОРЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЮ БЕЗПЕКОЮ ДЛЯ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ТА НАУКОВИХ УСТАНОВ

**Шило Г. М.**

*здобувач освіти другого (магістерського) рівня  
кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
просп. Науки, 14, Харків, Україна;  
доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри комп'ютерних наук  
Запорізький національний університет  
вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна  
[orcid.org/0000-0002-5020-6707](https://orcid.org/0000-0002-5020-6707)  
[shilo.gn@gmail.com](mailto:shilo.gn@gmail.com)*

**Добринін І. С.**

*кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
просп. Науки, 14, Харків, Україна  
[orcid.org/0000-0001-8910-2609](https://orcid.org/0000-0001-8910-2609)  
[ihor.dobrynin@nure.ua](mailto:ihor.dobrynin@nure.ua)*

**Матвіїшина Н. В.**

*кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри комп'ютерних наук  
Запорізький національний університет  
вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна  
[orcid.org/0000-0001-7938-4622](https://orcid.org/0000-0001-7938-4622)  
[mnv2902@gmail.com](mailto:mnv2902@gmail.com)*

**Ключові слова:** *інформаційна безпека, метод аналізу ієрархій, методи прийняття рішень, багатокритеріальна оптимізація, кіберстійкість.*

У статті розглянуто особливості впровадження систем управління інформаційною безпекою (СУІБ) у закладах вищої освіти та наукових установах. Показано актуальність захисту інформаційних активів, зокрема персональних даних здобувачів і співробітників, конфіденційних досліджень і технологій подвійного призначення в умовах зростання кіберзагроз. Проведено аналіз поточного стану інформаційної безпеки в українських навчальних закладах, що виявляє основні проблеми, як-от обмежене фінансування, нестача кваліфікованих фахівців та відсутність стандартизованих підходів. Досліджено досвід упровадження систем управління інформаційною безпекою в університетах різних країн.

У статті розглядаються різні методики побудови СУІБ, що містить лінійку міжнародних стандартів ISO/IEC 27000, методологію IT-Grundschutz та вимоги Національного банку України. Здійснено порівняння цих підходів із погляду ефективності, гнучкості та відповідності нормативним вимогам. Для вибору оптимальної методики використано метод аналізу ієрархій (АНР), що дає змогу оцінити й порівняти альтернативи на основі

багатьох критеріїв: сфера застосування; орієнтація; гнучкість; технічна деталізація; сертифікація; юридична відповідність; витрати на впровадження.

З огляду на специфіку діяльності навчальних закладів і відповідність міжнародним стандартам, зроблено висновок, що найбільш ефективним підходом до створення СУІБ є використання лінійки міжнародних стандартів ISO/IEC 27000. Основними перевагами розробки СУІБ на базі стандарту ISO/IEC 27001:2022 для університетів є універсальність та можливість проведення сертифікації, яка зміцнює довіру партнерів і державних структур, а також розширює можливості міжнародного співробітництва. Запропоновано основні поступові кроки впровадження СУІБ за ISO/IEC 27001:2022, починаючи від діагностичного аудиту й розробки політик до сертифікації та постійного вдосконалення. Підкреслено важливість системного підходу до інформаційної безпеки у вищих навчальних закладах і наукових установах, що дасть змогу забезпечити стабільну роботу та міжнародну співпрацю.

## ANALYSIS OF APPROACHES TO CREATING INFORMATION SECURITY MANAGEMENT SYSTEMS FOR HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS AND RESEARCH ESTABLISHMENTS

**Shilo G. M.**

*Master's Degree Student at the V. V. Popovskyy Department  
of Infocommunication Engineering  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
Nauky Ave., 14, Kharkiv, Ukraine;  
Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of the Department of Computer Science  
Zaporizhzhia National University,  
Universytetska str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine  
orcid.org/0000-0002-5020-6707  
shilo.gn@gmail.com*

**Dobrynin I. S.**

*Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the V. V. Popovskyy Department  
of Infocommunication Engineering  
Kharkiv National University of Radio Electronic  
Nauky Ave., 14, Kharkiv, Ukraine  
orcid.org/0000-0001-8910-2609  
ihor.dobrynin@nure.ua*

**Matviyishyna N. V.**

*Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Computer Science  
Zaporizhzhia National University  
Universytetska str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine  
orcid.org/0000-0001-7938-4622  
mnv2902@gmail.com*

**Key words:** *Information Security, Analytic Hierarchy Process, Decision-Making Methods, Multi-Criteria Optimization, Cyber Resilience.*

The article examines the peculiarities of implementing Information Security Management Systems (ISMS) in higher education institutions and research establishments. It highlights the relevance of protecting information assets, particularly students' and staff's personal data, confidential research, and dual-use technologies, amid growing cyber threats. The current state of information

security in Ukrainian educational institutions is analyzed, identifying key issues such as limited funding, a lack of qualified professionals, and the absence of standardized approaches. The experience of implementing ISMS in universities across different countries is also explored.

The article reviews various ISMS construction methodologies, including international standards ISO/IEC 27000, the IT-Grundschutz methodology, and the requirements of the National Bank of Ukraine. These approaches are compared in terms of efficiency, flexibility, and compliance with regulatory requirements. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is utilized to select the optimal methodology, allowing the evaluation and comparison of alternatives based on multiple criteria: scope of application, orientation, flexibility, technical detailing, certification, legal compliance, and implementation costs.

The conclusion is drawn that, given the specifics of educational institutions and the need for international standards compliance, the most effective approach to ISMS creation is the use of ISO/IEC 27000 international standards. The main advantages of developing an ISMS based on the ISO/IEC 27001:2022 standard for universities include its universality and the possibility of certification, which strengthens trust among partners and government bodies and expands opportunities for international cooperation. The article proposes key incremental steps for implementing ISMS under ISO/IEC 27001:2022, starting from initial auditing and policy development to certification and continuous improvement. The importance of a systematic approach to information security in higher education institutions and research establishments is emphasized, ensuring stable operation and international collaboration.

**Вступ.** У сучасному світі питання забезпечення інформаційної безпеки набуває особливого значення. Це стосується не лише комерційних організацій, а й закладів вищої освіти та наукових установ, які зберігають великий обсяг даних, що містять результати наукових досліджень, інноваційні розробки, технології подвійного призначення, внутрішню конфіденційну інформацію, персональні дані співробітників та здобувачів. В умовах зростаючої кількості кіберзагроз виникає потреба у створенні ефективних систем управління інформаційною безпекою (СУІБ), які забезпечать можливість захисту інформаційних ресурсів та усунення ризиків, що є критичними для діяльності закладів і установ. Однак відсутність стандартизованих підходів для навчальних закладів і наукових установ України, труднощі з виділенням достатніх фінансових ресурсів, проблеми з пошуком фахівців з інформаційної безпеки ускладнюють процес впровадження та підтримки СУІБ.

Актуальність проведення цього дослідження зумовлена потребою в забезпеченні конфіденційності, цілісності та доступності інформаційних ресурсів і розробці уніфікованого підходу для створення СУІБ закладів вищої освіти та наукових установ. Крім того, належний рівень інформаційної безпеки є ключовим фактором для підтримки довіри партнерів і розвитку міжнародної співпраці. Упровадження ефективних СУІБ сприятиме не лише підвищенню рівня кіберстійкості цих установ, а й створенню умов для їхнього сталого розвитку.

Об'єктом цього дослідження є процеси створення та впровадження систем управління інформаційною безпекою в закладах вищої освіти й наукових установах України. Метою дослідження є вибір оптимальної методики побудови СУІБ, яка забезпечить високий рівень захисту інформації,

відповідність міжнародним стандартам і сприятиме розвитку міжнародної співпраці.

Основними завданнями дослідження є:

- визначення критеріїв для порівняння різних методик створення СУІБ;

- аналіз наявних підходів до побудови СУІБ за допомогою методів багатокритеріальної оптимізації;

- визначення основних кроків впровадження вибраної методики для підвищення кіберстійкості організацій.

Гіпотезою дослідження є припущення, що застосування методу аналізу ієрархій для вибору методики побудови СУІБ дасть змогу знайти оптимальне рішення, яке враховуватиме специфіку діяльності навчально-наукових закладів, забезпечить їхню інформаційну безпеку, відповідність нормативно-правовим актам і міжнародним стандартам.

Отже, проведення цього дослідження є важливим кроком у підвищенні рівня інформаційної безпеки закладів вищої освіти й наукових установ України та сприятиме їхній успішній інтеграції у світову наукову спільноту.

**Огляд літератури.** Під час створення моделі інформаційної безпеки в університетах України основний акцент робиться на захисті персональних даних здобувачів і співробітників, збереженні конфіденційності дослідницької інформації, на дотриманні законодавства України щодо захисту інформації, а також інтеграції з національними системами: системою електронного документообігу й електронними кабінетами здобувачів. Університети стикаються з такими проблемами, як відсутність стандартизованих підходів щодо створення СУІБ, обмежене фінансування, нестача кваліфікованих кадрів, складність інтеграції сучасних засобів захисту із застарілими інформаційними системами. Враховуючи такі умови, в університетах вирішують окремі задачі щодо інформаційної безпеки: створю-

ють відділи, наприклад служби захисту інформації, до основних завдань яких входить організація та координація робіт, пов'язаних із захистом інформації в автоматизованих системах. В окремих університетах також розробляють політики інформаційної безпеки, проте аналіз показав, що проблема потребує комплексного вирішення у всіх закладах вищої освіти та наукових установах України.

Досвід закордонних університетів демонструє використання міжнародних стандартів ISO/IEC 27001, NIST, GDPR (для країн ЄС) та інших, що забезпечують високий рівень відповідності міжнародним вимогам. Значна увага приділяється захисту наукових досліджень, захисту інтелектуальної власності, а також управлінню ризиками. Аналіз впровадження СУІБ у вищих навчальних закладах наведено в публікаціях [1]–[5]. А саме автори наголошують на важливості проведення аналізу ризиків, розробки політик безпеки та наводять детальний план впровадження СУІБ на основі стандарту ISO/IEC 27001:2013 [1]. Також дослідження підтверджують, що впровадження СУІБ дає змогу значно зменшити ризики втрати даних і підвищити рівень довіри з боку партнерів і здобувачів [2]. У публікаціях підкреслюється значення стандартів ISO/IEC 27001 та NIST Cybersecurity Framework у забезпеченні кібербезпеки у вищих навчальних закладах [3]. Особливу увагу також приділено аналізу ключових загроз і вразливостей, з якими стикаються університети, та пропонуються стратегії їхньої мінімізації [4]. Для планування подальших кроків у вдосконаленні систем безпеки пропонується модель для оцінки зрілості інформаційної безпеки [5]. Отже, впровадження СУІБ є ключовим фактором у забезпеченні інформаційної безпеки вищих навчальних закладів і наукових установ. Вибір відповідної методики та її адаптація до конкретних умов є критично важливими для досягнення високого рівня захисту інформаційних ресурсів.

Заклади вищої освіти та наукові установи потребують ефективної системи управління інформаційною безпекою для забезпечення захисту даних, підтримки стабільності роботи й відповідності нормативним вимогам. Найчастіше для створення таких системи застосовують стандарти ISO/IEC 27001:2022, методологію IT-Grundschutz та вимоги Національного банку України. Аналіз переваг і недоліків цих підходів надає можливість вибрати ефективний спосіб створення СУІБ. Вибір оптимальної методики потребує врахування критеріїв, пов'язаних із вартістю впровадження, можливістю міжнародної сертифікації, урахування ризик-орієнтованого підходу тощо.

До вивчення проблеми прийняття рішень в умовах наявності багатьох критеріїв долучалися відомі вітчизняні та зарубіжні вчені як у сфері економіки, так і у сфері математичного моделювання. Це насамперед Т. Сааті [6], А. В. Лотов,

В. В. Вітлінський, М. О. Перестюк, С. І. Наконечний та багато інших. Значна кількість наукових праць присвячена можливостям використання методу аналізу ієрархій у різних галузях економіки та соціології, зокрема, це роботи В. І. Дубровіна, І. С. Скітера, Е. Ю. Сахна, С. В. Мамалиги, М. А. Синенко [7].

**Методи.** Для вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації та вибору оптимальної методики створення СУІБ організацій може бути використано метод аналізу ієрархій [8] (Analytic Hierarchy Process, АНР) – це потужний інструмент, розроблений Томасом Сааті, який використовується для вирішення складних задач прийняття рішень, де присутні множинні, часто суперечливі критерії [6]. Цей метод дає змогу структурувати складну проблему, розбиваючи її на ієрархію більш простих елементів, і порівнювати ці елементи попарно.

Основні принципи АНР:

- ієрархічна структура (проблема розбивається на ієрархію рівнів: мета, критерії, альтернативи; кожен наступний рівень деталізує попередній);

- попарні порівняння (елементи кожного рівня порівнюються попарно за важливістю або бажаністю; для цього можна використовувати шкалу Сааті, яка дає змогу виразити відносну важливість одного елемента щодо іншого);

- синтез суджень (отримані за результатами попарних порівнянь судження синтезуються для визначення вагових коефіцієнтів кожного елемента);

- консистентність суджень (метод АНР дає можливість перевірити, наскільки судження експерта є узгодженими; якщо судження несуперечливі, то отримані результати будуть більш надійними).

Етапи застосування АНР:

- формулювання проблеми (чітке формулювання мети й визначення альтернативних рішень);

- побудова ієрархії (розбиття проблеми на ієрархію рівнів);

- попарні порівняння (порівняння елементів кожного рівня за шкалою Сааті);

- перевірка консистентності (оцінка узгодженості суджень експерта);

- синтез суджень (обчислення вагових коефіцієнтів для кожного елемента);

- прийняття рішення (вибір альтернативи з найбільшим загальним ваговим коефіцієнтом).

**Результати**

**Визначення критеріїв для порівняння різних методик створення СУІБ**

Для визначення критеріїв та вибору ефективного способу створення СУІБ було проведено аналіз переваг і недоліків стандартів ISO/IEC 27001:2022 [9], методології IT-Grundschutz [10] та вимог Національного банку України [11].



Стандарт ISO/IEC 27001:2022 пропонує міжнародно визнану структуру для управління ризиками інформаційної безпеки. Він забезпечує адаптацію до будь-якого типу організацій, включно з навчальними закладами та науковими центрами. Використання стандарту надає можливість:

- врахувати контекст організації та середовища, а саме технологічну інфраструктуру, законодавство України та міжнародне партнерство;
- провести оцінювання ризиків, а саме ідентифікацію вразливостей для інформаційної інфраструктури;
- розробити заходи контролю, що спрямовані на забезпечення конфіденційності, цілісності й доступності інформаційних активів, а саме впровадити заходи безпеки з каталогу стандарту;
- проводити моніторинг, що забезпечить постійний контроль за ефективністю СУІБ і її вдосконалення.

Основними перевагами розробки СУІБ на базі стандарту ISO/IEC 27001:2022 для університетів є універсальність і можливість інтеграції з іншими міжнародними стандартами та можливість проведення сертифікації, яка зміцнює довіру партнерів і державних структур, а також розширює можливості міжнародного співробітництва.

До обмежень можна віднести високі витрати на впровадження та відсутність технічних специфікацій, які потрібно розробляти окремо.

На відміну від стандарту ISO/IEC 27001:2022 методологія компанії IT-Grundschutz орієнтована на використання шаблонних підходів до забезпечення інформаційної безпеки, а саме пропонує стандартизовані заходи, які можна адаптувати для навчальних закладів і наукових установ. Застосування методології дає можливість:

- вибрати захисні механізми з готових рішень для інфраструктури організації;
- проводити моделювання загроз і використовувати шаблони для оцінювання ризиків. Напри-

клад, сценарії атак на хмарні сервіси, IoT-обладнання;

- застосовувати практичні інструкції щодо впровадження захисту для апаратного забезпечення, програмного коду, мережеских інтерфейсів.

Основними перевагами використання методології IT-Grundschutz є чіткі рекомендації щодо технічної реалізації, скорочення часу на впровадження стандартних рішень. Однак цей підхід менш гнучкий порівняно з ISO/IEC 27001 і потребує додаткових ресурсів для адаптації до українського законодавства.

Вимоги Національного банку України (НБУ) стосуються фінансових установ, але їх можна застосувати для державних і критичних об'єктів інфраструктури, зокрема наукових установ. Розробка СУІБ відповідно до вимог НБУ дає змогу:

- провести класифікації критичних активів;
- забезпечити контроль доступу, а саме впровадження жорстких механізмів автентифікації та моніторингу доступу до даних;
- розробити політику реагування на кіберінциденти, регулярне тестування планів реагування;
- забезпечити юридичну відповідність, а саме забезпечення узгодженості з GDPR та ЗУ «Про захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах».

До переваг використання вимог НБУ для закладів вищої освіти та наукових установ можна віднести жорсткий регламент, який забезпечує високий рівень захисту; орієнтацію на ризик-орієнтоване управління; врахування локальних нормативних вимог. Однак у цьому підході виникають складнощі інтеграції з міжнародними стандартами без адаптації та необхідність модифікації для навчальних закладів, тому що основний фокус вимог на банківській сфері. Для порівняння підходів було визначено критерії: сфера застосування, орієнтація, гнучкість, технічна деталізація, сертифікація, юридична відповідність та витрати на впровадження (табл. 1).

Таблиця 1

**Порівняльна таблиця підходів до створення СУІБ для навчально-наукових центрів закладів вищої освіти**

Критерій	ISO/IEC 27001:2022	IT-Grundschutz	Вимоги НБУ
Сфера застосування	Універсальна	Шаблонні рішення для державних і великих організацій	Банківський сектор і критична інфраструктура
Орієнтація	Ризик-орієнтований підхід	Технічні шаблони та заходи	Регуляторний контроль
Гнучкість	Висока	Середня	Низька
Технічна деталізація	Загальний підхід	Детальні технічні рекомендації	Деталізовані вимоги
Сертифікація	Міжнародна сертифікація можлива	Сертифікація Grundschutz-Profil	Внутрішній аудит, контроль НБУ
Юридична відповідність	Локальні та міжнародні закони	Переважно локальний контекст Німеччини	Відповідність українському законодавству
Витрати на впровадження	Високі	Середні	Високі (через потребу в адаптації до навчально-наукового центру)

**Аналіз наявних підходів до побудови СУІБ за допомогою методу аналізу ієрархій**

*Формулювання проблеми* – вибрати оптимальну методику побудови СУІБ для університетів і наукових установ за методом аналізу ієрархій. Визначено альтернативи: ISO/IEC 27001:2022, IT-Grundschutz, Вимоги НБУ. Визначено критерії: сфера застосування (1), орієнтація (2), гнучкість (3), технічна деталізація (4), сертифікація (5), юридична відповідність (6) і витрати на впровадження (7).

*Побудова ієрархії.* На рис. 1 представлено ієрархічну модель побудови СУІБ для закладів вищої освіти та наукових установ, на якій зазначено мету, перелік критеріїв та альтернатив.

*Попарні порівняння за шкалою Сааті.* Визначається відносна важливість кожної пари критеріїв. Для цього використовується шкала Сааті [6]:

- 1 – критерії однаково важливі;
- 3 – один критерій дещо важливіший за інший;
- 5 – значно важливіший;
- 7 – суттєво важливіший;
- 9 – абсолютно важливіший;
- проміжні значення (2, 4, 6, 8) використовуються для уточнень.

Для критеріїв, визначених у формулюванні проблеми, за результатами експертних оцінювань отримано матрицю парних порівнянь (табл. 2).

Матриця вказує, що основними пріоритетами у виборі методики побудови СУІБ є такі:

- наскільки методика охоплює потрібну сферу застосування;
- наскільки методика відповідає орієнтації на певний вид управління;
- якими є витрати на впровадження.

Таблиця 2

**Матриця парних порівнянь для критеріїв другого рівня ієрархії**

Критерії	1	2	3	4	5	6	7
1	1	3	5	7	5	3	2
2	1/3	1	3	5	3	2	1
3	1/5	1/3	1	3	2	1	1/2
4	1/7	1/5	1/3	1	2	1	1/3
5	1/5	1/3	1/2	1/2	1	3	2
6	1/3	1/2	1	1	1/3	1	2
7	1/2	1	2	3	1/2	1/2	1

*Визначення вектора пріоритетів* – нормалізованого набору значень, де кожний елемент вектора є часткою важливості певного критерію.

Для розрахунку вектора пріоритетів виконано такі кроки:

– обчислено суму стовпців матриці парних порівнянь для критеріїв другого рівня ієрархії (табл. 2):

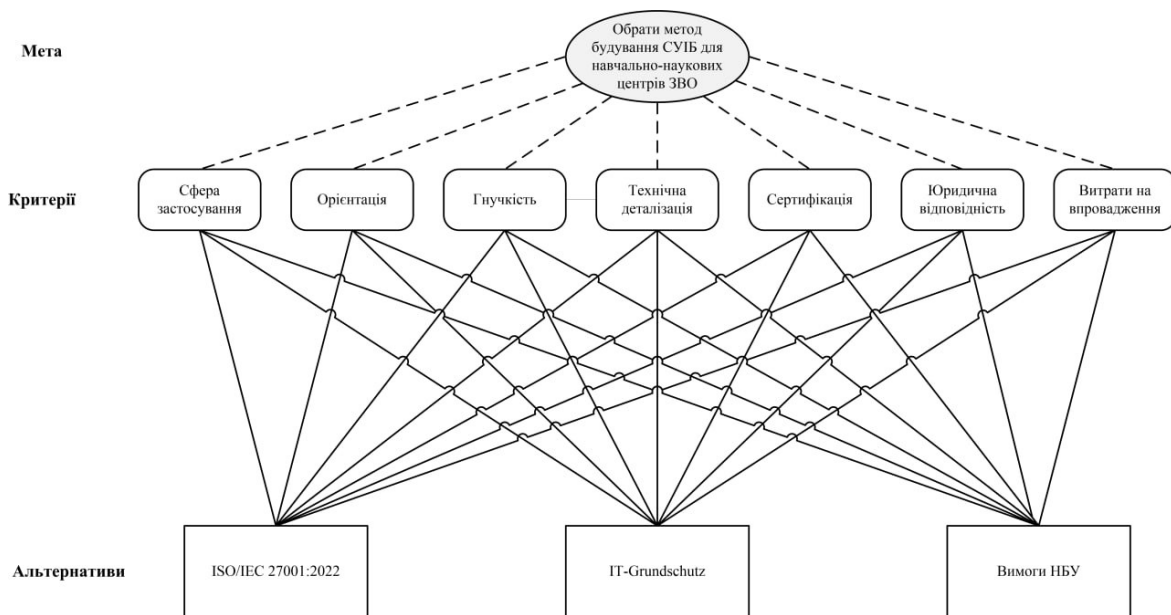
$$S = [2,7095; 6,3666; 12,8333; 20,5000; 13,8333; 11,5000; 8,8300];$$

– визначено нормалізовану матрицю, кожний елемент якої поділено на суму відповідного стовпця (табл. 3).

Таблиця 3

**Нормалізована матриця**

0,3691	0,4712	0,3896	0,3415	0,3614	0,2609	0,2265
0,1230	0,1571	0,2338	0,2439	0,2169	0,1739	0,1133
0,0738	0,0524	0,0779	0,1463	0,1446	0,0870	0,0566
0,0527	0,0314	0,0260	0,0488	0,1446	0,0870	0,0374
0,0738	0,0524	0,0390	0,0244	0,0723	0,2609	0,2265
0,1230	0,0785	0,0779	0,0488	0,0241	0,0870	0,2265
0,1845	0,1571	0,1558	0,1463	0,0361	0,0435	0,1133



**Рис. 1. Ієрархічна модель вибору методу побудови СУІБ**

Вектор пріоритетів для критеріїв наведеної задачі дорівнює середньому значенню рядків нормалізованої матриці  $W = [0,3457; 0,1802; 0,0912; 0,0612; 0,1070; 0,0951; 0,1195]$  (табл. 4).

Таблиця 4

## Критерії та їхні вагові коефіцієнти

Критерій	Вага
Сфера застосування	0,3457 (34,47 %)
Орієнтація	0,1802 (18,2 %)
Гнучкість	0,0912 (9,12 %)
Технічна деталізація	0,0612 (6,12 %)
Сертифікація	0,1070 (10,70 %)
Юридична відповідність	0,0951 (9,51 %)
Витрати на впровадження	0,1195 (11,95 %)

*Оцінка альтернатив.* Альтернативи, які розглядаються для оцінювання:

- ISO/IEC 27001:2022 – міжнародний стандарт із загальними вимогами до СУІБ;
- IT-Grundschutz – німецька методика з фокусуванням на деталізацію та готові шаблони;
- вимоги НБУ – нормативна база для українських фінансових установ.

Для кожного критерію оцінюється кожна альтернатива (табл. 5):

- 1 – низький рівень відповідності критерію;
- 3 – середній рівень;
- 5 – високий рівень.

Таблиця 5

## Оцінки альтернатив

Критерій	ISO/IEC 27001:2022	IT-Grundschutz	Вимоги НБУ
Сфера застосування	5	4	3
Орієнтація	4	3	5
Гнучкість	4	5	2
Технічна деталізація	3	5	2
Сертифікація	5	4	2
Юридична відповідність	4	3	5
Витрати на впровадження	3	4	5

*Розрахунок.* Рейтинг альтернативи обчислюється за формулою:

$$\text{Рейтинг альтернативи} = \sum_{i=1}^n (\text{вага критерію} \cdot \text{оцінка}_i)$$

Результати обчислень наведено в табл. 6.

Таблиця 6

## Рейтинг альтернатив

Альтернатива	Рейтинг
ISO/IEC 27001:2022	4,2716
IT-Grundschutz	3,8767
Вимоги НБУ	3,5299

Отже, ISO/IEC 27001:2022 має найвищий рейтинг, який дорівнює 4,27, оскільки добре відповідає таким важливим критеріям, як *сфера застосування, сертифікація і юридична відповідність*. IT-Grundschutz має рейтинг 3,88, цей підхід отримав сильні оцінки за *гнучкість і технічну деталізацію*, але поступається за *орієнтацією та сферою застосування*. Вимоги НБУ отримали рейтинг 3,53 та показали найкращий результат за *юридичною відповідністю та витратами*, але мають низькі оцінки за *гнучкість і технічну деталізацію*.

**Висновки.** Запровадження систем управління інформаційною безпекою (СУІБ) в університетах і наукових установах є критично важливим для захисту інформаційних активів в умовах зростання кіберзагроз. Підхід, базований на стандарті ISO/IEC 27001:2022, забезпечує комплексний процес створення СУІБ. Для ефективного впровадження в університетах і наукових установах України потрібно стандартизувати основні етапи для цього типу організацій. Пропонується здійснювати впровадження СУІБ в університетах і наукових установах у п'ять основних етапів:

- підготовчий етап, що дасть можливість проведення діагностичного аудиту для оцінки поточного стану інформаційної безпеки; ідентифікації критичних активів і загроз; розробки та впровадження політик інформаційної безпеки; формування команди з інформаційної безпеки;

- впровадження основних заходів, що забезпечить налаштування технічних засобів захисту, як-от системи контролю доступу, антивірусне програмне забезпечення; проведення навчання персоналу з основ інформаційної безпеки; розробку плану реагування на інциденти;

- посилення й оптимізація, що містить процедури проведення детального аналізу ризиків та управління; встановлення систем моніторингу та контролю мережевого трафіку; оновлення політик відповідно до нових законодавчих вимог і технологічних змін;

- проведення аудиту для оцінки відповідності вимогам ISO/IEC 27001:2022; підготовка до зовнішніх аудитів (другою та третьою стороною); отримання сертифікату відповідності;

- підтримка та вдосконалення, що забезпечує регулярний внутрішній та зовнішній аудит для підтримання відповідності стандарту; постійне вдосконалення політик і процедур; підвищення обізнаності персоналу про нові загрози та методи захисту.

Опис кожного етапу дає чітке розуміння проблеми, яка має бути вирішена. Етапи розроблено так, щоб перехід від початкового етапу до кожного наступного не потребував надмірних фінансових витрат і надмірного часу.

Отже, такий підхід сприятиме запровадженню поступового введення нових процедур і забезпеченню високого рівня кіберстійкості, що дасть змогу університетам та науковим установам не

лише ефективно захищати свої інформаційні ресурси, а й зміцнити довіру партнерів і державних структур, а також розширити можливості міжнародної співпраці.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Marhad S.S., Abd Goni S.Z., Abdullah Sani M.K.J. Implementation of Information Security Management Systems for Data Protection in Organizations: A systematic literature review. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*. 2024. Vol. 9, SI18. P. 197–203. DOI: <https://doi.org/10.21834/e-bpj.v9isi18.5483> (date of access: 30.11.2024).
2. Hernandez Collante L., Pranolo A., Prasetya Wibawa A. Implementation plan of the information security management system based on the NTC-ISO-IEC 27001:2013 standard and security risk analysis. Case study: Higher education institution. *Transactions on Energy Systems and Engineering Applications*. 2024. Vol. 5, no. 2. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.32397/tesea.vol5.n2.635> (date of access: 30.11.2024).
3. Amine A.M., Chakir E.M., Issam T., Khamlichi Y.I. A Review of Cybersecurity Management Standards Applied in Higher Education Institutions. *International Journal of Safety and Security Engineering*. 2023. Vol. 13, no. 6. P. 1109–1116. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijss.130614> (date of access: 30.11.2024).
4. Ulven J.B., Wangen G. A Systematic Review of Cybersecurity Risks in Higher Education. *Future Internet*. 2021. Vol. 13, no. 2. P. 39. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi13020039> (date of access: 30.11.2024).
5. Makupi D. A Design of Information Security Maturity Model for Universities Based on ISO 27001. *The International Journal of Business & Management*. 2019. Vol. 7, no. 6. P. 134–139. DOI: <https://doi.org/10.24940/theijbm/2019/v7/i6/bm1906-038> (date of access: 30.11.2024).
6. Saaty T. L. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*. Pittsburgh : RWS Publications, 2013. 477 p.
7. Синенко М. Метод Сааті при прийнятті управлінських рішень на прикладі підприємства малого бізнесу. *Інтелект XXI*. 2018. № 1. С. 235–238.
8. Фукс М. Моделювання багатокритеріальної задачі оптимізації вибору методики побудови СУІБ методами Томаса Сааті. *Перспективи розвитку інфокомунікацій та інформаційно-вимірювальних технологій* : матеріали 28-го Міжнар. молодіж. форуму, м. Харків, 16–18 квіт. 2024 р. Харків, 2024. С. 92–93.
9. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection. Information security management systems. Requirements. URL: <https://www.iso.org/standard/27001> (date of access: 30.11.2024).
10. IT-Grundschtz. A systematic basis for information security. Federal Office for Information Security. URL: [https://www.bsi.bund.de/EN/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Standards-und-Zertifizierung/IT-Grundschtz/it-grundschtz\\_node.html](https://www.bsi.bund.de/EN/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Standards-und-Zertifizierung/IT-Grundschtz/it-grundschtz_node.html) (дата звернення: 30.11.2024).
11. Про затвердження Положення про організацію заходів із забезпечення інформаційної безпеки в банківській системі України : постанова Нац. банку України від 28.09.2017 № 95. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0095500-17#Text> (дата звернення: 30.11.2024).

#### REFERENCES

1. Marhad, S.S., Abd Goni, S.Z., Abdullah Sani, M.K.J. (2024). Implementation of Information Security Management Systems for Data Protection in Organizations: A systematic literature review. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*. Vol. 9, SI18. P. 197–203. DOI: <https://doi.org/10.21834/e-bpj.v9isi18.5483> (date of access: 30.11.2024).
2. Hernandez Collante, L., Pranolo, A., Prasetya Wibawa, A. (2024). Implementation plan of the information security management system based on the NTC-ISO-IEC 27001:2013 standard and security risk analysis. Case study: Higher education institution. *Transactions on Energy Systems and Engineering Applications*. Vol. 5, no. 2. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.32397/tesea.vol5.n2.635> (date of access: 30.11.2024).
3. Amine, A.M., Chakir, E.M., Issam, T., Khamlichi, Y.I. (2023). A Review of Cybersecurity Management Standards Applied in Higher Education Institutions. *International Journal of Safety and Security Engineering*. Vol. 13, no. 6. P. 1109–1116. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijss.130614> (date of access: 30.11.2024).
4. Ulven, J.B., Wangen, G. (2021). A Systematic Review of Cybersecurity Risks in Higher Education. *Future Internet*. Vol. 13, no. 2. P. 39. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi13020039> (date of access: 30.11.2024).
5. Makupi, D. (2019). A Design of Information Security Maturity Model for Universities Based on ISO 27001. *The International Journal of Business & Management*. Vol. 7, no. 6. P. 134–139. DOI: <https://doi.org/10.24940/theijbm/2019/v7/i6/bm1906-038> (date of access: 30.11.2024).

6. Saaty, T.L. (2013). *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*. Pittsburgh: RWS Publications, 477 p.
7. Synenko, M. (2018). Metod Saati pry pryiniatti upravlinskykh rishen na prykladi pidpriemstva maloho biznesu. *Intelekt XXI*. No. 1. P. 235–238.
8. Fuks, M. (2024). Modeliuvannia bahatokryterialnoi zadachi optymizatsii vyboru metodyky pobudovy SUIB metodamy Tomasa Saati. *Perspektyvy rozvytku infokomunikatsii ta informatsiino-vymiriuvalnykh tekhnolohii*: materialy 28-ho Mizhnar. molodizh. forumu, m. Kharkiv, 16–18 kvit. 2024 r. Kharkiv, p. 92–93.
9. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection. Information security management systems. Requirements. URL: <https://www.iso.org/standard/27001> (date of access: 30.11.2024).
10. IT-Grundschutz. A systematic basis for information security. Federal Office for Information Security. URL: [https://www.bsi.bund.de/EN/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Standards-und-Zertifizierung/IT-Grundschutz/it-grundschutz\\_node.html](https://www.bsi.bund.de/EN/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Standards-und-Zertifizierung/IT-Grundschutz/it-grundschutz_node.html) (date of access: 30.11.2024).
11. Pro zatverdzhennia Polozhennia pro orhanizatsiiu zakhodiv iz zabezpechennia informatsiinoi bezpeky v bankivskii systemi Ukrainy: postanova Nats. banku Ukrainy vid 28.09.2017 № 95. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0095500-17#Text> (date of access: 30.11.2024).

## АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ТА ФІЛЬТРАЦІЯ ШУМІВ У ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ

**Шило Г. М.**

*доктор технічних наук,  
завідувач кафедри комп'ютерних наук  
Запорізький національний університет  
вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна  
[orcid.org/0000-0002-5020-6707](https://orcid.org/0000-0002-5020-6707)  
[shilo.gn@gmail.com](mailto:shilo.gn@gmail.com)*

**Лебедєва-Дичко А. С.**

*аспірант кафедри комп'ютерних наук  
Запорізький національний університет  
вул. Університетська, 66, Запоріжжя, Україна  
[orcid.org/0009-0003-1931-1861](https://orcid.org/0009-0003-1931-1861)  
[ldas.1405@gmail.com](mailto:ldas.1405@gmail.com)*

**Ключові слова:** *позиціонування об'єктів, промислові зони, Starlink, обробка сигналів, фільтр Калмана.*

У статті розглядається задача підвищення точності позиціонування об'єктів на промислових майданчиках, де традиційні системи, такі як GPS і Wi-Fi, часто не забезпечують достатньої точності через різноманітні технічні обмеження та умови середовища. Особливо це стосується відкритих просторів із високою концентрацією металевих конструкцій та зі змінною конфігурацією території, що може призводити до значних похибок у визначенні місця розташування об'єктів. У таких умовах точність визначення координат стає критично важливою, оскільки традиційні системи не завжди можуть гарантувати необхідну якість позиціонування. Дослідження зосереджене на підвищенні точності визначення місця розташування об'єктів на відкритих, віддалених від міста ділянках, де використання стандартних рішень обмежене, а похибки можуть бути занадто великими для задоволення потреб підприємств. Основну увагу приділено аналізу даних, що отримано із супутникової системи Starlink, яка надає нові можливості для визначення позиціонування. Ця система дозволяє отримувати сигнали, що можуть бути більш стабільними у порівнянні з іншими системами, однак навіть вона має свої обмеження через вплив навколишніх факторів. Для зменшення шумів і підвищення точності сигналу, одержуваного від Starlink, застосовується фільтр Калмана. Цей фільтр дозволяє більш ефективно обробляти сигнали, відфільтровуючи непотрібні шумові дані, і таким чином покращувати точність кінцевих результатів позиціонування. Експериментальні результати показують, що використання фільтра Калмана знижує похибки позиціонування і забезпечує більш точні результати порівняно з традиційними методами. Завдяки фільтрації шумів та поліпшенню обробки сигналів, система на основі Starlink з фільтром Калмана може забезпечити більш високу точність визначення місця розташування об'єктів навіть у складних умовах. Проте, незважаючи на значне підвищення точності, досягнута точність залишається недостатньою для використання на критично важливих об'єктах. Це робить необхідним подальший аналіз і розробку гібридних систем позиціонування.

## ANALYSIS OF POSITIONING ACCURACY USING SATELLITE SYSTEMS AND NOISE FILTERING IN INDUSTRIAL ENVIRONMENTS

**Shilo G. M.**

*Doctor of Technical Sciences,  
Head of the Department of Computer Science  
Zaporizhzhia National University  
Universytetska str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine  
orcid.org/0000-0002-5020-6707  
shilo.gn@gmail.com*

**Lebedieva-Dychko A. S.**

*Postgraduate Student at the Department of Computer Science  
Zaporizhzhia National University  
Universytetska str., 66, Zaporizhzhia, Ukraine  
orcid.org/0009-0003-1931-1861  
ldas.1405@gmail.com*

**Key words:** *object positioning, industrial zones, Starlink, signal processing, Kalman filter.*

This article discusses the problem of improving the accuracy of object positioning at industrial sites, where traditional systems such as GPS and Wi-Fi often do not provide sufficient accuracy due to various technical limitations and environmental conditions. This is especially true in open spaces with a high concentration of metal structures and a variable territory configuration, which can lead to significant errors in determining the location of objects. In such conditions, the accuracy of coordinate determination becomes critical, as traditional systems cannot always guarantee the required quality of positioning. The study focuses on improving the accuracy of object location in open areas remote from the city, where the use of standard solutions is limited and errors can be too large to meet the needs of enterprises.

The main focus is on analyzing data obtained from the Starlink satellite system, which provides new opportunities for positioning. This system provides signals that can be more stable than other systems, but even it has its limitations due to the influence of environmental factors. A Kalman filter is used to reduce noise and improve the accuracy of the signal received from Starlink. This filter allows for more efficient signal processing by filtering out unnecessary noise data, thus improving the accuracy of the final positioning results.

Experimental results show that the use of the Kalman filter reduces positioning errors and provides more accurate results than traditional methods. Due to noise filtering and improved signal processing, the Starlink-based system with Kalman filter can provide higher accuracy in object location even in difficult conditions. However, despite the significant increase in accuracy, the achieved accuracy remains insufficient for use at critical facilities. This makes it necessary to further analyze and develop hybrid positioning systems.

**Вступ.** В умовах стрімкого технологічного прогресу питання точного позиціонування об'єктів стає дедалі актуальнішим. Надійні системи позиціонування відіграють ключову роль у таких галузях, як промисловість, будівництво, логістика та інші, оскільки вони безпосередньо впливають на ефективність і безпеку процесів [1]. Важливо забезпечувати високу точність позиціонування, зберігаючи при цьому мобільність і економічність рішень, особливо на об'єктах зі змінною конфігурацією майданчиків.

Зміни конфігурації майданчиків можуть істотно вплинути на якість сигналу, ускладнюючи точне визначення місця розташування об'єкта. Традиційні мобільні системи, а саме GPS, можуть показувати похибку від 10 метрів до кількох кілометрів і втрачати сигнал на майданчиках зі складною конфігурацією та металевими конструкціями. Системи Wi-Fi можуть давати точність до 3-5 метрів, але вимагають великої кількості точок доступу, що збільшує вартість і складність установки [2].

Останніми роками дедалі більше уваги приділяється супутниковим системам, таким як Starlink, які пропонують унікальні переваги завдяки своїй стійкості та ширококутовому сигналу, що перевершує потужності традиційних систем. Starlink забезпечує глобальне покриття через мережу супутників на низькій навколоземній орбіті, що дає змогу підтримувати стабільний зв'язок в умовах відсутності стільникового покриття та у віддалених регіонах [3].

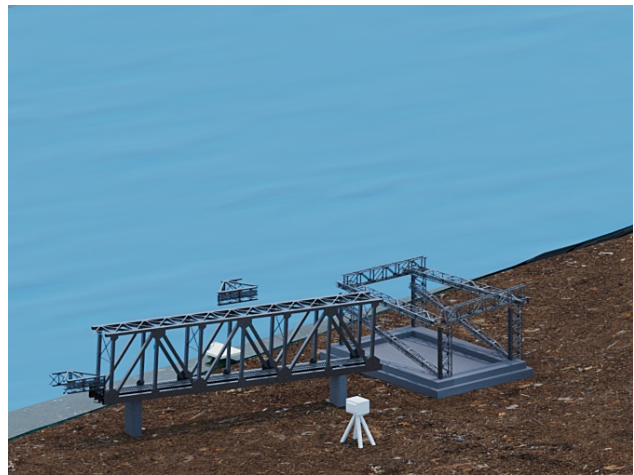
Сигнали Starlink мають високу потужність, що покращує якість зв'язку і знижує втрати сигналу в складних умовах, наприклад, за наявності множинних перешкод. На відміну від GPS, призначеного тільки для навігації, Starlink підтримує високошвидкісний інтернет і передачу великих обсягів даних, що особливо важливо за необхідності відстеження значної кількості об'єктів одночасно.

Однак Starlink має обмеження щодо точності. Хоча Starlink пропонує більш потужні сигнали, ніж GPS, обидва супутникових типи схильні до спотворень, спричинених атмосферними умовами та багатопроменевими ефектами. Це особливо впливає при зміні ландшафту і наявності металевих конструкцій, які можуть блокувати пряму видимість супутників. Тому метою дослідження є аналіз точності позиціонування об'єктів за допомогою супутникової технології Starlink на відкритому промисловому майданчику.

**Методи.** Для аналізу даних щодо місця знаходження об'єкту та відхилень Starlink від його базової установки було проведено дослідження на будівельному майданчику, де проводились роботи з монтажу металокопункцій та їх установлення у проектне положення за допомогою великого кранового обладнання. Спочатку координати для установки Starlink були визначені за допомогою геодезичної зйомки, проведеної з використанням приладу Leica GS18 T. Цей прилад поєднує високу точність GNSS з технологією компенсації нахилу, що спрощує і прискорює роботи на місцевості, даючи змогу отримувати координати з точністю  $3 \text{ мм} + 0.5 \text{ ppm}$  (широта, довгота, висота). Отримані експериментальним шляхом координати були прийняті за еталонні.

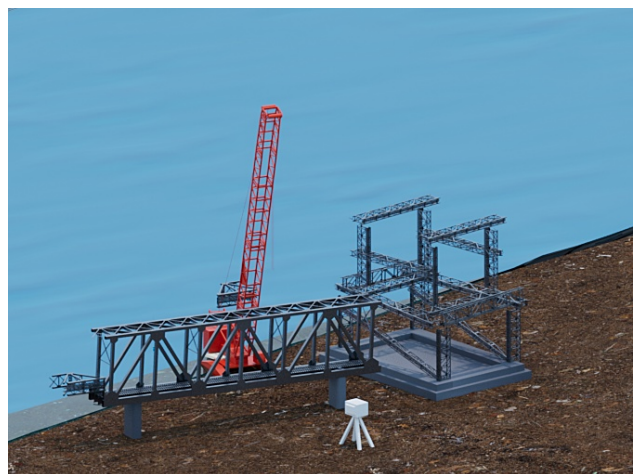
За допомогою API Starlink на сервері було зібрано дані за період у п'ять місяців. Дослідження проводили в умовах уже встановлених металокопункцій, які знаходились на будівельному майданчику (рис. 1), що від самого початку впливало на точність вимірювань місця знаходження об'єкту. Додатковим фактором, який міг впливати на точність даних, був ефект багаторазового відбиття сигналу.

Отже, у процесі дослідження було зібрано дані, які дадуть змогу провести аналіз точності позиціонування за допомогою Starlink в умовах, що характерні для об'єктів зі змінним ландшафтом.



**Рис. 1. Конфігурація майданчика проведення досліджень станом на перший місяць**

Протягом п'яти місяців структура і зовнішній вигляд майданчика значно змінювались, положення Starlink не змінювалось. Майданчик розширювався у вертикальному та у горизонтальному напрямках (рис. 2). Збільшилася кількість металокопункцій, а поблизу розташування Starlink перебувала великогабаритна кранова техніка (рис. 3).



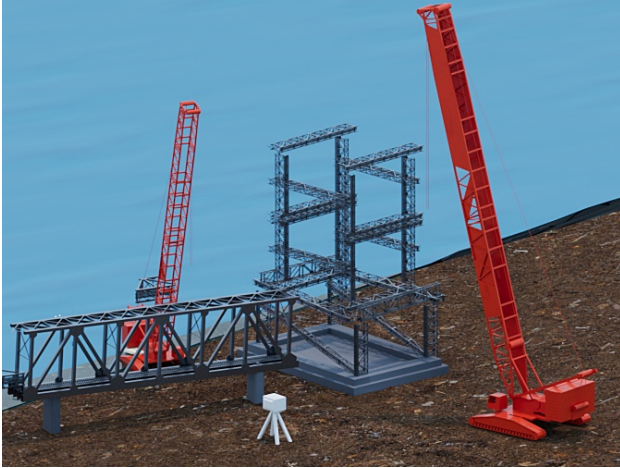
**Рис. 2. Конфігурація майданчика проведення досліджень станом на третій місяць**

Ці зміни могли значно вплинути на якість сигналу, створюючи додаткові джерела багаторазових віддзеркалень і, як наслідок, збільшуючи ймовірність появи похибок у позиціонуванні.

Для підвищення точності даних і згладжування отриманих шумів, що обумовлено зовнішніми факторами, доцільно застосувати методи фільтрації даних [4]. Одним із найефективніших підходів у даному випадку є використання фільтра Калмана [5]. Цей метод дає змогу прогнозувати та коригувати показання в реальному часі, зни-



жуючи рівень шумів і впливу неконтрольованих чинників на дані про положення. Фільтр Калмана здатний врахувати як динамічні зміни ландшафту майданчика, так і тимчасові спотворення у сигналі, що зробить дані визначення позиції об'єкту більш точними та надійними в умовах мінливого навколишнього середовища [6].



**Рис. 3. Конфігурація майданчика проведення досліджень станом на п'ятий місяць**

Метод Калмана, також відомий як лінійний фільтр Калмана, підходить для систем, які можна описати за допомогою лінійних рівнянь.

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k \quad (1)$$

де  $x_k$  - поточний стан (позиція, швидкість);  
 $F_k$  - матриця переходу стану;  
 $B_k$  - матриця управління;  
 $u_k$  - керуючий вплив;  
 $w_k$  - шум системи.

У формулі Калмана матриця переходу стану  $F_k$  визначає як система переходить із одного стану до іншого. Враховуючи статичне розташування Starlink, матриця  $F_k$  зводиться до одиничної матриці, оскільки координати об'єкта не повинні змінюватися в часі.

У класичній формулі Калмана (1) матриця управління  $B_k$  описує керуючий вплив на систему. У даному експерименті, оскільки об'єкт статичний, керуючих впливів немає, і матриця  $B_k$  може бути виключена. А вектор  $w_k$ , який представляє шум або відхилення від еталонного значення, залишається.

Отже, вираз (1) для визначення стану системи зводиться до:

$$x_k = I x_{k-1} + w_k, \quad (2)$$

де  $I$  - одинична матриця.

Для врахування наявного шуму та корекції на основі фактичних вимірів, ми використовуємо процедуру коригування за виразом (3), який доз-

воляє точніше визначити стан системи на основі отриманих даних. Корекція на основі вимірювань надає можливість отримувати прогнозоване значення координат, наближаючи його до фактичного, залежно від рівня шуму у вимірах.

$$x_k = x_{k-1} + K_k (z_k - H_k x_k), \quad (3)$$

де  $z_k$  - виміряне значення;  
 $H_k$  - матриця спостережень;  
 $K_k$  - коефіцієнт Калмана.

$$K_k = \frac{P_k}{P_k + R}, \quad (4)$$

де  $P_k$  - коваріація помилок передбачення;  
 $R$  - коваріація шуму вимірювань.

Значення коваріації шуму процесу  $Q$  можна прийняти як дисперсію змін  $Var(\Delta x)$  координат:

$$Var(\Delta x) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\Delta x_k - \bar{\Delta x})^2, \quad (5)$$

де  $n$  - кількість вимірювань;  
 $\bar{\Delta x}$  - середнє значення змін.

Отже, коваріація шуму процесу  $Q$  приблизно дорівнює 0,0000035. Такий підхід дозволяє оцінити наскільки координати змінюються між вимірюваннями.

Значення коваріації шуму вимірювань  $R$  можна обчислити за формулою:

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (e_k - \bar{e})^2, \quad (6)$$

де  $n$  - кількість вимірювань;  
 $e_k$  - середнє значення змін;  
 $\bar{e}$  - середнє значення похибки.

Отже, на основі даних було розраховано коваріацію шуму вимірювань.  $R \approx 0,0000645$ .

За результатами обчислень було побудовано графіки, які ілюструють динаміку зміни координат (широти та довготи) протягом п'яти місяців.

**Результати.** Під час аналізу зібраних даних про позиціонування Starlink було виявлено, що під час зміни кількості та розмірів металоконструкцій на будівельному майданчику середні значення відхилень місця знаходження об'єкту значно варіювалися (табл. 1).

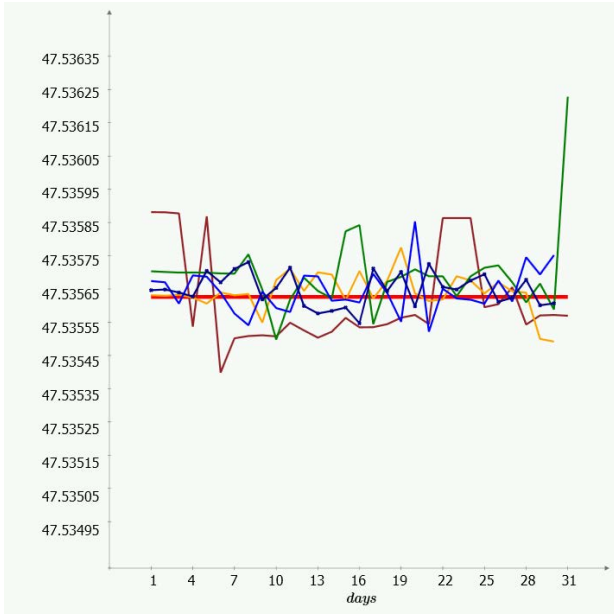
Таблиця 1

**Відхилення даних позиціонування від еталонного значення**

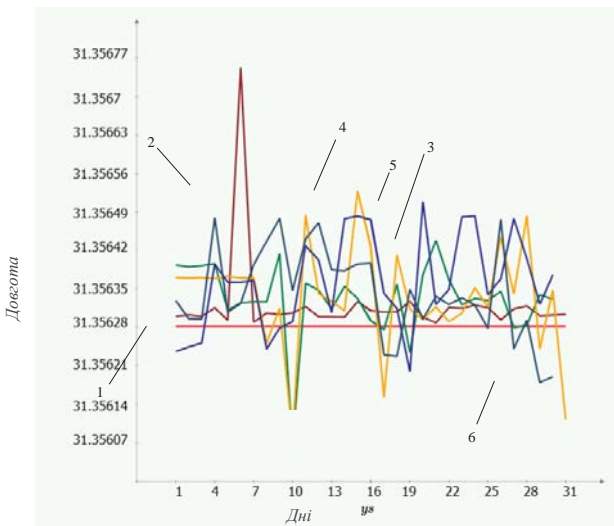
Номер місяця	Середнє відхилення, м
1	766,67
2	771,7
3	807,2
4	875,4
5	869,36

Ці зміни були викликані виникненням шумів у даних через ефект багаторазового відбиття сиг-

налу і погіршення умов видимості супутникової мережі Starlink. Виходячи з наведених у таблиці відхилень, зі збільшенням кількості перешкод і складних конструкцій середнє відхилення позиціонування об'єкту зросло з 766,67 м у першому місяці до 875,4 м у останньому.

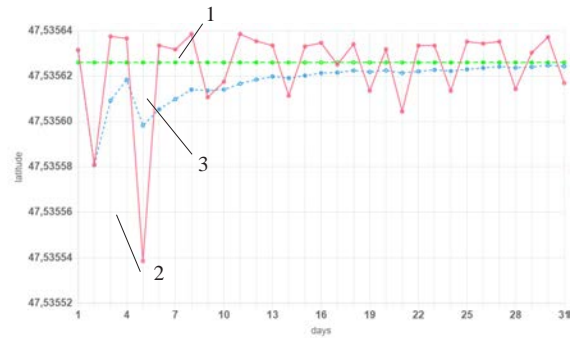


**Рис. 4. Графік змін широти відносно встановленої константи широти (1- еталонне значення, 2-перший місяць, 3-другий місяць, 4-третій місяць, 5-четвертий місяць, 6-п'ятий місяць)**

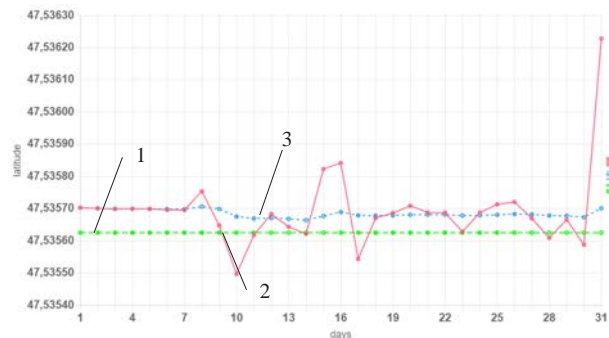


**Рис. 5. Графік змін довготи відносно встановленої константи довготи (1- еталонне значення, 2-перший місяць, 3-другий місяць, 4-третій місяць, 5-четвертий місяць, 6-п'ятий місяць)**

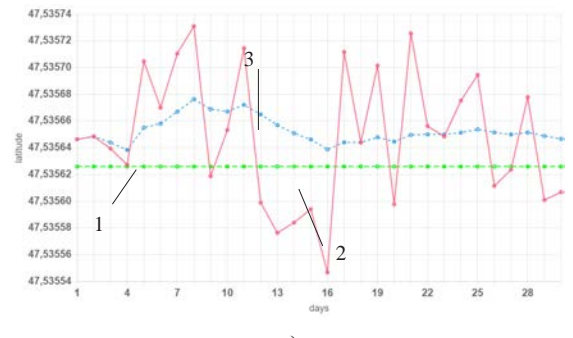
За результатами, представленими на рис. 6 і 7, фільтр Калмана було застосовано для зниження рівня шумів під час обробки сигналу. На графіку зображено три криві, що відображають етапи корекції даних: 1 – еталонне значення, 2 – вимірне значення, 3 – значення після обробки фільтром.



а)



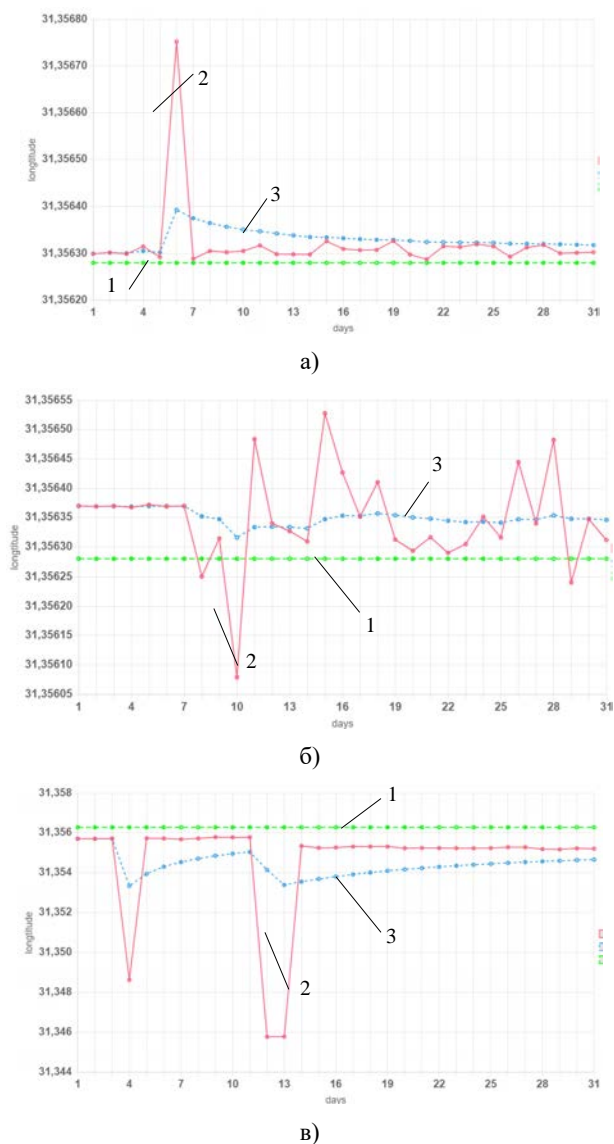
б)



в)

**Рис. 6. Графік зниження шумів на показник широти із застосуванням фільтра Калмана за місяцями (а – перший, б – третій, в – п'ятий)**

Як видно з графіків, дані, отримані за допомогою фільтра Калмана, дають менше похибку по відношенню до еталонного положення об'єкту, порівняно з необробленими даними. Проте відхилення у середньому по місяцях дорівнює 314 м. Це демонструє ефективність методу, який дає змогу



**Рис. 7. Графіки зниження шумів на показник довготи із застосуванням фільтра Калмана за місяцями (а – перший, б – третій, в – п'ятий)**

мінімізувати різницю між виміряним і реальним положенням об'єкта, але точність недостатня.

Представлені розрахунки показують, що використання фільтра Калмана для корекції помилок

робить систему позиціонування гнучкішою та стійкішою до змін в умовах середовища. Функція адаптації дає змогу системі підлаштуватися під такі чинники, як зміна конфігурації майданчика, наявність металевих конструкцій і погіршення якості сигналу.

**Висновок.** Під час проведеного дослідження системи позиціонування з використанням Starlink на будівельному майданчику з умовами, що змінюються, було встановлено, що фільтр Калмана надає можливість значно знизити рівень шумів і зменшити похибку визначення місцеположення. Застосування цього підходу під час експерименту дозволило скоротити відхилення геопозиції в середньому з 800 до 314 метрів в реальних умовах із завадами у вигляді металевих конструкцій та великогабаритного кранового обладнання.

Однак для вирішення завдань, що потребують більшої точності, особливо в умовах, що динамічно змінюються, поточний рівень точності залишається недостатнім. Найбільш значущі джерела похибки пов'язані з багаторазовим відбиттям сигналу від металевих конструкцій та водних поверхонь. Також значний вплив на точність вносить поява наземних перешкод, що погіршують видимість супутників та зменшують якість сигналу.

Для подальшого поліпшення точності позиціонування та мінімізації похибок необхідно інтегрувати додаткові технології визначення розташування об'єкта на майданчику. Одним із перспективних рішень є використання технології Bluetooth, яка може надавати додаткові дані. Інтеграція результатів глобального і локального позиціонування дозволяє підвищити загальну точність визначення місцеположення об'єкта. Перевірка адаптивного фільтра Калмана в умовах злиття даних із різних пристроїв, а саме Starlink і Bluetooth-датчиків, дасть змогу підвищити точність і надійність системи позиціонування.

Отже, подальші дослідження мають бути спрямовані на розроблення гібридної системи, що використовує дані позиціонування, отримані за допомогою різних технологій, для досягнення більшої точності в умовах складної конфігурації будівельного майданчика та динамічної зміни ландшафту.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Groves, P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. 2nd ed., Artech House, 2013.
2. Outdoor Positioning for Industrial Workplace Lebedieva-Dychko, A., Shilo, G. 2023 IEEE 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems, CADSM 2023 - Proceedings, 2023
3. Grayver E., Nelson R., McDonald E., Sorensen E., Romano S. Позиціонування та навігація за допомогою Starlink, 2024.
4. Fadali, M. S. (2024). Introduction to Random Signals, Estimation Theory, and Kalman Filtering. [Publisher details not available].

5. Li, X., & Zhao, Y. (2022). Kalman Filtering and Information Fusion: Theory and Applications. [Publisher details not available].
6. Grewal, M. S., & Andrews, A. P. (2020). Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB (4th ed.). Hoboken, NJ : Wiley.
7. Шмана К.С., Красножон О.В. Використання фільтрів Калмана та Маджвіка для обробки показань інерційних датчиків. *Новітні технології в науковій діяльності та навчальному процесі*. Чернігівський національний технологічний університет, 2022.

#### REFERENCES

1. Groves, P. D. (2013) Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. 2nd ed., Artech House.
2. Outdoor Positioning for Industrial Workplace Lebedieva-Dychko, A., Shilo, G. 2023 IEEE 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems, CADSM 2023 - Proceedings, 2023.
3. Grayver E., Nelson R., McDonald E., Sorensen E., Romano S. (2024) Pozytsionuvannia ta navihatsiia za dopomohoiu Starlink.
4. Fadali, M. S. (2024). Introduction to Random Signals, Estimation Theory, and Kalman Filtering. [Publisher details not available].
5. Li, X., & Zhao, Y. (2022). Kalman Filtering and Information Fusion: Theory and Applications. [Publisher details not available].
6. Grewal, M. S., & Andrews, A. P. (2020). Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
7. Shmana K. S., Krasnozhon O. V. (2022) Vykorystannia filtriv Kalman ta Madzhvika dlia obrobky pokazan inertsiinykh datchykyv // Modern Technologies in Scientific Activity and Educational Process. Chernihiv National University of Technology.

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ У ЖУРНАЛІ «COMPUTER SCIENCE AND APPLIED MATHEMATICS»

### Вимоги до оформлення статей:

До друку приймаються статті, що мають наукову і практичну цінність. Автор має право представити тільки одну наукову статтю в один номер, яка раніше не публікувалася. Автор несе відповідальність за оригінальність тексту статті, точність наведених фактів, цитат, статистичних даних, власних назв, географічних назв та інших відомостей, а також за те, що в матеріалах не містяться дані, що не підлягають відкритій публікації. Редакція не несе відповідальності за викладену в статті інформацію. Остаточне рішення про публікацію ухвалюється редакцією, яка також залишає за собою право на додаткове рецензування, редагування і відхилення статей.

### Технічні вимоги:

- до друку приймаються статті українською, російською та англійською мовами;
- електронний варіант статті у форматі \*.doc, \*.docx або \*.rtf, підготовлений у текстовому редакторі Microsoft Word;
- формат А4 через 1,5 інтервал;
- шрифт Times New Roman, розмір 14;
- поля: ліве – 3 см, праве – 1,5 см, верхнє, нижнє – 2 см.

### Структура статті:

- рядок 1** – УДК (вирівнювання по лівому краю);
- рядок 2** – назва тематичного розділу (вирівнювання по лівому краю);
- рядок 3** – назва статті (вирівнювання по центру, напівжирний шрифт, великі літери);
- рядок 4** – прізвище та ініціали автора статті; науковий ступінь, вчене звання, посада із зазначенням кафедри (вирівнювання по центру);
- рядок 5** – місце роботи (навчання), адреса роботи (навчання), orcid-код, електронна адреса автора (вирівнювання по центру).

Якщо автор не має orcid-коду, його можна отримати за посиланням <https://orcid.org/>

**абзац 1** – розширена анотація (1800 знаків без пробілів) та ключові слова (мінімум 5 слів), написані мовою, як і уся стаття;

**абзац 2** – назва статті (напівжирний шрифт, усі літери великі), прізвище, ініціали автора, науковий ступінь, вчене звання, посада із зазначенням кафедри, місце роботи (навчання), адреса роботи (навчання), orcid-код, електронна адреса автора, розширена анотація (1800 знаків без пробілів) та ключові слова (мінімум 5 слів), написані **англійською мовою**. Переклад англійською мовою повинен бути достовірним (не машинним).

У випадку, якщо стаття не українською мовою, обов'язково подаються назва статті (напівжирний шрифт, усі літери великі), прізвище, ініціали автора, науковий ступінь, вчене звання, посада із зазначенням кафедри, місце роботи (навчання), адреса роботи (навчання), orcid-код, електронна адреса автора, розширена анотація (1800 знаків без пробілів) та ключові слова (мінімум 5 слів), написані українською мовою.

Основний текст статті повинен відповідати структурі IMRAD (Introduction, Methods, Results, and Discussion) + Literature Review:

Вступ – короткий вступ (1-2 сторінки), який повинен дати відповіді на запитання «чому проведено дослідження?», «які об'єкт, мета й основні гіпотези дослідження?»; Огляд літератури - розділ, що містить аналіз останніх публікацій за темою дослідження (переважна більшість публікацій повинна бути за останні 5 років, самоцитовання не більше 30% від кількості літературних джерел), з огляду літератури читачі повинні мати змогу оцінити стан проблеми у світі, аналіз літературних джерел повинен мати критичний характер;

Методи – розділ, який може включати 2-3 рівнозначних за обсягом параграфи, що висвітлюють основні методи, підходи, алгоритми дослідження;

Результати – розділ, який містить аналіз основних результатів дослідження (графіки, таблиці з чисельними даними, загалом, результати обчислювальних експериментів); Дискусія – розділ (до 1 сторінки), який також можна назвати Висновок або Висновки, що містить порівняння отриманих результатів з результатами інших досліджень (як власних так інших авторів), а також дає відповідь на запитання «які перспективи дослідження?», формулює наукову новизну результатів.

Література розміщується після статті у порядку згадування; друкується через 1,5 інтервал, 14 розміром, шрифтом Times New Roman і оформляється у відповідності вимог міждержавного стандарту ДСТУ 8302:2015.

Посилання на літературу в тексті слід давати в квадратних дужках, наприклад, [2, с. 25; 5, с. 33], в яких перша цифра вказує порядковий номер джерела в списку літератури, а друга – відповідну сторінку в цьому джерелі; одне джерело (без сторінок) відокремлюється від іншого крапкою з комою [3; 4; 6; 8; 12; 15].

Наприкінці статті розміщується транслітерована і перекладена англійською версія літератури (References), оформлена згідно з вимогами APA (American Psychological Association).

**Порядок подання матеріалів:**

Для публікації статті у фаховому науковому виданні необхідно надіслати на електронну адресу редакції [editor@physmath.journalsofznu.zp.ua](mailto:editor@physmath.journalsofznu.zp.ua) наступні матеріали:

**добре вчитану наукову статтю**, обов’язково оформлену відповідно до вказаних вимог;  
**інформаційну довідку про автора**;  
відскановане **підтвердження сплати коштів** (реквізити для сплати надаються автору після вдалого проходження рецензування).

*Зразок оформлення назви електронних файлів:* Іваненко\_І.І.\_стаття, Іваненко\_І.І.\_оплата.

**Адреса та контактні дані:**

Редакція журналу «Computer Science and Applied Mathematics»  
вул. Університетська 66, корп. 1, ауд. 21(б), м. Запоріжжя, Україна, 69060

**Телефон:** +38 (066) 53 57 687

**Електронна пошта:** [editor@physmath.journalsofznu.zp.ua](mailto:editor@physmath.journalsofznu.zp.ua)

**Офіційний сайт:** [www.journalsofznu.zp.ua/index.php/comp-science](http://www.journalsofznu.zp.ua/index.php/comp-science)

## НОТАТКИ

Науковий журнал

**Computer Science and Applied Mathematics**

№ 2, 2024

Комп'ютерна верстка – Н.С. Кузнєцова  
Коректура – В.І. Вишнякова

Підписано до друку: 25.12.2024.  
Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.  
Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 13,02.  
Замов. № 0125/102. Наклад 100 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»  
65101, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1  
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08  
E-mail: mailbox@helvetica.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.