

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

ЧЕРКАСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Технічні науки

Заснований у грудні 1996 р.

1/2021

Редакційна колегія:

Фауре Е. В., д-р техн. наук, професор
(головний редактор)

Антонюк В. С., д-р техн. наук, професор

Базіло К. В., д-р техн. наук, доцент

Батраченко О. В., канд. техн. наук, доцент

Бондаренко М. О., д-р техн. наук, доцент

Бондаренко Ю. Ю., канд. техн. наук, доцент

Вамболь В. В., д-р техн. наук, професор

Вашенко В. А., д-р техн. наук, професор

Вязовик В. М., д-р техн. наук, доцент

Гальченко В. Я., д-р техн. наук, професор

Заболотний С. В., д-р техн. наук, доцент

Кажіс Р., д-р техн. наук, професор

Котов В. М., д-р фіз.-мат. наук, професор

Лукашенко В. М., д-р техн. наук, професор

Мусієнко М. П., д-р техн. наук, професор

Нерода М. В., канд. техн. наук, доцент

Палагін В. В., д-р техн. наук, професор

Півоваров О. А., д-р техн. наук, професор

Прокопенко Т. О., д-р техн. наук, професор

Ситник О. О., д-р техн. наук, професор

Столяренко Г. С., д-р техн. наук, професор

Уткіна Т. Ю., канд. техн. наук, доцент

Федоров Є. Є., д-р техн. наук, професор

Хоменко О. М., канд. хім. наук, доцент

ЗАСНОВНИК І ВИДАВЕЦЬ – Черкаський
державний технологічний університет

Свідоцтво про державну реєстрацію
друкованого засобу масової інформації
КВ № 6061 від 16.04.2002 р.

Виходить 4 рази на рік

У ВИПУСКУ:

**АВТОМАТИЗАЦІЯ
ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ІНЖЕНЕРІЯ**

РЕДАКЦІЙНА РАДА ВИДАННЯ

Григор О. О., д-р політ. наук, доцент, ректор
Черкаського державного технологічного
університету (голова Ради);

Гончаров А. В., канд. техн. наук, доцент,
перший проректор ЧДТУ;

Фауре Е. В., д-р техн. наук, професор,
проректор з наук.-дослід. роботи і міжнар.
зв'язків ЧДТУ;

Столяренко Г. С., д-р техн. наук, професор;
Литвин О. В., нач. ред.-видав. відділу

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

ЧДТУ, к. 604/1, бульвар Шевченка, 460,
м. Черкаси, 18006,
тел. (0472) 51-15-89

vtn.chdtu.edu.ua (подання статей)

Сисоєнко С. В. (відповідальний секретар)
e-mail: vtn@chdtu.edu.ua

1•2021

ВІСНИК

**Черкаського державного
технологічного університету**

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

VISNYK

**Cherkaskogo derzhavnogo
tehnologichnogo universitetu**

TECHNICAL SCIENCE

1 • 2021

**Видання включене до Переліку
наукових фахових видань України
як фахове видання з технічних наук
(спеціальності 101, 113, 121, 122, 123, 125,
126, 131, 132, 133, 151, 152, 161, 172)
категорія «Б»
(накази МОНУ від 02.07.2020 №886,
від 24.09.2020 №1188)**

**Видання зареєстровано
у міжнародних наукометричних базах,
каталогах і системах пошуку:**
Index Copernicus Journals Master List,
BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref,
Directory of Open Access Journals (DOAJ),
Eurasian Scientific Journal Index (ESJI),
ResearchBib – Academic Resource Index,
Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat,
Наукова періодика України,
Open Ukrainian Citation Index

**Електронна версія:
vtn.chdtu.edu.ua; visnyk.chdtu.edu.ua**

Затверджено вченою радою
Черкаського державного
технологічного університету,
протокол № 10 від 15.03.2021 р.

При повному або частковому
передрукуванні матеріалів
посилання на «Вісник Черкаського
державного технологічного
університету» є обов'язковим.

ЗМІСТ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

<i>Трембовецька Р. В., Гальченко В. Я., Тичков В. В.</i> Лінійний сурогатний синтез рамкових тангенціальних вихрострумів перетворювачів з об'ємною структурою системи збудження.....	5
<i>Гайдукевич С. В., Семенова Н. П., Леськів Я. А.</i> Автоматизована система керування електрообладнанням у спорудах закритого ґрунту.....	20
<i>Стахова А. П., Квасніков В. П.</i> Автоматизація виявлення дефектів машинного обладнання засобами вібродіагностики	32
<i>Передерко А. Л.</i> Засоби забезпечення динамічного діапазону вимірювального каналу.....	42
<i>Квасніков В. П., Катаєва М. О.</i> Аналіз і класифікація метрологічного забезпечення вимірювань рельєфу нанооб'єктів	50
<i>Моркун В. С., Котов І. А.</i> Критерії оперативного моніторингу бази професійних концептів комплексу автоматизації керування енергосистеми	59

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Тарасенко Я. В.</i> Метод виявлення і збереження неподільної семантичної складової англійського маніпулятивного тексту пропагандного дискурсу на основі квантового формалізму.....	70
<i>Tazetdinov V. A., Sysoienko S. V.</i> Neural network system for selection of table tennis equipment	79
<i>Пильтай С. И., Булашенко А. В., Фесюк И. В., Булашенко А. В.</i> Компактный преобразователь поляризации для спутниковых антенных систем.....	86
<i>Забегалов И. В., Шарпан Я. Э., Дихтярук И. И., Пильтай С. И., Булашенко А. В.</i> Волноводная система питания рупорной антенны с круговой поляризацией.....	99
<i>Ромашко С. В., Харенко В. Б., Литовченко В. В., Підгорний М. В.</i> Моделі руху автотранспортних засобів при перехресних зіткненнях.....	114
<i>Прокопенко Т. О., Лавданська О. В.</i> Оцінка конфліктності композиції ролей продуктового менеджера і власника продукту у проектних командах.....	124
<i>Гардер Д. А.</i> Інформаційна технологія параметричної оптимізації режимів автоматизованого лазерного зварювання в умовах невизначеності.....	133

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖЕНЕРІЯ

<i>Руденко В. Г., Іваненко І. М., Косогіна І. В., Бурмак А. П.</i> Новий ефективний вуглецевий адсорбент для знезалізнєння води	144
<i>Онищук О. О.</i> Оптимізація розрахунку температури та швидкості для теплообмінних процесів в адіабатичних умовах	155
<i>Чернова А. С., Гевод В. С., Ісаєва А. У.</i> Порівняння прямої та витіснювальної біофільтрації в пристроях децентралізованого очищення води.....	162
<i>Шкурдодда С. В., Солодовнік Т. В., Пасічник В. В., Король К. П., Шинкаренко Д. Ю.</i> Методи визначення вмісту Δ9-тетрагідроканнабінолу в насінні конопель методом газової хроматографії: аналіз і наукове обґрунтування.....	173

CONTENTS

AUTOMATION AND CONSTRUCTION OF DEVICES

Trembovetska R. V., Halchenko V. Ya., Tychkov V. V. Linear surrogate synthesis of frame tangential eddy current probes with a volumetric structure of the excitation system.....	5
Gaydukevich S. V., Semenova N. P., Leskiv Ya. A. Automated electrical equipment control system in indoor ground structures.....	20
Stakhova A. P., Kvasnikov V. P. Automation of detection of machine equipment defects by vibrodiagnostics.....	32
Perederko A. L. Means of providing dynamic range of the measuring channel.....	42
Kvasnikov V. P., Kataieva M. O. Analysis and classification of metrological support of measurements of nanoobjects relief.....	50
Morkun V. S., Kotov I. A. Criteria for operational monitoring of professional concepts base of the complex of power system control automation	59

INFORMATION TECHNOLOGIES

Tarasenko Ya. V. Method of detection and preservation of indivisible semantic component of English manipulative text of propaganda discourse based on quantum formalism	70
Tazetdinov V. A., Sysoienko S. V. Neural network system for selection of table tennis equipment	79
Piltyay S. I., Bulashenko A. V., Fesyuk I. V., Bulashenko O. V. Compact polarization converter for satellite antenna systems.....	86
Zabegalov I. V., Sharpan Ya. E., Dikhtyaruk I. I., Piltyay S. I., Bulashenko A. V. Waveguide power supply system of a horn antenna with circular polarization	99
Romashko S. V., Kharenko V. B., Lytovchenko V. V., Pidhornyy M. V. Models of motion of motor vehicles in cross-collisions	114
Prokopenko T. O., Lavdanska O. V. Assessment of the conflict composition of the roles of product manager and product owner in project teams	124
Harder D. A. Information technology of parametric optimization of modes of automated laser welding in conditions of uncertainty	133

CHEMICAL TECHNOLOGIES AND ENGINEERING

Rudenko V. G., Ivanenko I. M., Kosogina I. V., Burmak A. P. New efficient carbon adsorbent for water deironing.....	144
Onyschuk O. O. Optimization of temperature and speed calculation for heat exchange processes in adiabatic conditions.....	155
Chernova A. S., Gevod V. S., Isayeva A. U. Comparison of direct-flow and displacement biofiltration in decentralized water treatment devices.....	162
Shkurdoda S. V., Solodovnik T. V., Pasichnyk V. V., Korol K. P., Shynkarenko D. Yu. Methods for determination of Δ^9 -tetrahydrocannabinol content in seeds of hemp by gas chromatography method: analysis and scientific justification	173

[0000-0002-2308-6690] **Р. В. Трембовецька**, к.т.н., доцент,

e-mail: r.trembovetska@chdtu.edu.ua

[0000-0003-0304-372X] **В. Я. Гальченко**, д.т.н., професор,

[0000-0001-9997-307X] **В. В. Тичков**, к.т.н., доцент

Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ЛІНІЙНИЙ СУРОГАТНИЙ СИНТЕЗ РАМКОВИХ ТАНГЕНЦІАЛЬНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ОБ'ЄМНОЮ СТРУКТУРОЮ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ

Запропоновано математичний метод лінійного сурогатного параметричного синтезу рухомих рамкових тангенціальних накладних вихрострумових перетворювачів з однорідним розподілом густини вихрових струмів у зоні контролю об'єкта. Побудовано метамодель рамкового вихрострумового перетворювача з об'ємною структурою системи збудження. Прийнятну точність створеної метамоделі отримано шляхом застосування асоціативних нейронних мереж із методами підвищення точності та декомпозиції простору пошуку. Наведено чисельні результати і графічний матеріал, який ілюструє адекватність та інформативність отриманої метамоделі. Розглянуто приклади синтезу систем збудження із використанням сучасних метаевристичних стохастичних алгоритмів пошуку глобального екстремуму. Наведено чисельні результати отриманого розв'язку і графічний ілюстративний матеріал розподілу густини вихрових струмів на поверхні в зоні контролю об'єкта.

Ключові слова: рамкове джерело електромагнітного поля, густина вихрових струмів, рівномірна чутливість, електродинамічна модель, метамодель, адитивна нейромережева регресія.

Вступ. Створення однорідного поля збудження, що сприяє впевненому виявленню дефектів і визначенню їх геометричних параметрів засобами вихрострумового контролю, є актуальною та водночас складною проблемою. Широкий загал науковців досліджує вихрострумові перетворювачі, які мають електромагнітне поле (ЕМП) із заздалегідь визначеною топологією, що дає змогу покращити їх селективність і чутливість [1-3]. Детальний огляд науково-технічної інформації щодо використання ЕМП збудження із наперед заданими властивостями наведено в роботі [4], де розглянуто низку робіт, в яких висвітлено результати досліджень, коли лінійним або нелінійним синтезом досягається однорідний розподіл ЕМП на поверхні нерухомого об'єкта контролю (ОК).

В результаті проведеного аналізу встановлено практично повну відсутність відомостей про вирішення проблеми створення накладних вихрострумових перетворювачів (НВСП) із рівномірною чутливістю для рухомих ОК, що вимагає побудови систем збудження (СЗ) ЕМП, які забезпечують однорід-

ний розподіл густини вихрових струмів (ГВС) в ОК з урахуванням ефекту швидкості.

Необхідно відзначити, що в цьому напрямі авторами виконано низку досліджень стосовно кругових та рамкових НВСП. Так, у роботах авторів [5-8] висвітлено результати синтезу стосовно рухомих кругових НВСП із планарною структурою СЗ. В цих роботах розглядалися СЗ, в яких секційні котушки розташовувалися на одній висоті z_0 над ОК із рівномірним і нерівномірним розміщенням секцій вздовж радіуса. Процедура лінійного синтезу полягала у визначенні параметрів магніторушійної сили (МРС) I_m кожної котушки, тоді як для нелінійного – визначалися радіуси котушок та МРС. Для планарної структури СЗ із круговими секційними котушками значення приведеної похибки однорідності густини вихрових струмів у зоні контролю становило від 9 до 12 %, що є задовільним результатом.

Крім того, існують дослідження кругових НВСП [9, 10], що мають об'ємну гомогенну структуру СЗ із як рівномірним, так і нерівномірним розташуванням секцій. Для

розв'язку такої задачі синтезу попередньо створено багатопараметрову метамодель ВСП $\hat{J}=f(x, y, r, z_0)$, особливості побудови якої розглянуто в роботі [9]. Отримані результати чисельних експериментів демонструють переваги синтезованих об'ємних структур СЗ порівняно з планарними щодо забезпечення вимог однорідності.

Разом з тим, відомі рамкові НВСП, системи збудження яких розташовані паралельно чи перпендикулярно до ОК. Тангенціальні НВСП вважаються кращими при виявленні дефектів типу розшарувань [1]. Результати лінійного синтезу рамкових НВСП планарної структури СЗ наведено в роботі [11].

Однак серед класу рамкових НВСП залишаються недослідженими перетворювачі з об'ємною структурою СЗ та вертикальним розташуванням його відносно ОК. Тому доцільно дослідити рамковий тангенціальний НВСП із такою структурою СЗ як перспективний в сенсі можливості забезпечення апіорі заданого однорідного розподілу ГВС в зоні контролю.

Мета роботи: створення методу лінійного сурогатного синтезу рамкового тангенціального НВСП із об'ємною структурою СЗ та рівномірною чутливістю в зоні контролю, що забезпечується застосуванням стохастичного алгоритму пошуку екстремуму.

Виклад основного матеріалу дослідження

«Точна» модель прямої електродинамічної задачі. Сформульована мета вимагає розв'язання низки задач, а саме: опису «точними» математичними моделями розподілу

ГВС у зоні контролю, що створюється рухомим тангенціальним НВСП; створення метамоделі рамкового тангенціального НВСП з урахуванням ефекту швидкості з застосуванням комп'ютерних планів експерименту; реалізації лінійного сурогатного синтезу щодо створення НВСП з об'ємною структурою СЗ, що забезпечує рівномірну чутливість в зоні контролю.

Для розв'язку першої задачі, насамперед, розглядається джерело збудження ЕМП, яке складається з одинарного витка прямокутної форми, що розташований вертикально до ОК. Прямокутний виток із розмірами $2a \times 2b$ живиться змінним струмом I частотою ω та розташований на висоті z_0 над ОК, яка збігається з його геометричним центром. Досліджуваний об'єкт товщиною d має постійні питому електричну провідність σ та магнітну проникність μ_r . Середовище вважається лінійним, ізотропним і однорідним. Швидкість переміщення витка $\vec{v}=(v_x, v_y, 0)$ відносно ОК є постійною.

Взаємодія джерела поля у вигляді одинарного витка з ОК описується співвідношеннями комплексних складових магнітної індукції за просторовими координатами B_x, B_y, B_z , які отримані в результаті розв'язку диференціальних рівнянь Максвелла [12-14] за умови неперервності тангенціальних $H_{1t} = H_{2t}$ і нормальних $B_{1n} = B_{2n}$ складових поля на границях розділу середовищ. Тоді «точна» математична модель розподілу ГВС всередині ОК визначається через частинні похідні складових магнітної індукції за просторовими координатами x, y, z :

$$J_x = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial y} \left[-j \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{4 \cdot \pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi \cdot e^{(jx_0 \cdot \xi)} \cdot \sin(b \cdot \eta)}{\gamma \cdot \eta} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} + v_0 \cdot e^{-\left(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma\right) \cdot d} \right\} \cdot e^{\gamma \cdot z} - \left\{ 1 + \lambda_0 - v_0 \cdot e^{-\left(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma\right) \cdot d} \right\} \cdot e^{-\gamma \cdot z} \right] \cdot e^{-z_0 \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot \left(e^{a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - e^{-a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \right) \cdot e^{-j(x \cdot \xi + y \cdot \eta)} d\xi d\eta \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[-j \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{4 \cdot \pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi \cdot e^{(jx_0 \cdot \xi)} \cdot \sin(b \cdot \eta)}{(\xi^2 + \eta^2)} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} + v_0 \cdot e^{-\left(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma\right) \cdot d} \right\} \cdot e^{\gamma \cdot z} + \left\{ 1 + \lambda_0 - v_0 \cdot e^{-\left(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma\right) \cdot d} \right\} \cdot e^{-\gamma \cdot z} \right] \cdot e^{-z_0 \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot \left(e^{a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - e^{-a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \right) \cdot e^{-j(x \cdot \xi + y \cdot \eta)} d\xi d\eta \right] \right] \quad (1)$$

$$J_y = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \left[\frac{\partial}{\partial z} \left[-\frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{4 \cdot \pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi^2 \cdot e^{(jx_0 \cdot \xi)}}{\eta \cdot (\xi^2 + \eta^2)} \cdot \frac{\sin(b \cdot \eta)}{(1 - e^{2 \cdot \gamma \cdot d})} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} + \nu_0 \cdot e^{-(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma) \cdot d} \right\} \cdot e^{\gamma \cdot z} + \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \left\{ 1 + \lambda_0 - \nu_0 \cdot e^{-(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma) \cdot d} \right\} \cdot e^{-\gamma \cdot z} \right] \cdot e^{-z_0 \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot \left(e^{a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - e^{-a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \right) \cdot e^{-j(x \cdot \xi + y \cdot \eta)} d\xi d\eta \right] - \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial x} \left[j \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I}{4 \cdot \pi^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\xi \cdot e^{(jx_0 \cdot \xi)}}{\gamma \cdot \eta} \cdot \frac{\sin(b \cdot \eta)}{(1 - e^{2 \cdot \gamma \cdot d})} \cdot \left[\left\{ -(1 + \lambda_0) \cdot e^{2 \cdot \gamma \cdot d} + \nu_0 \cdot e^{-(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma) \cdot d} \right\} \cdot e^{\gamma \cdot z} - \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \left\{ 1 + \lambda_0 - \nu_0 \cdot e^{-(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma) \cdot d} \right\} \cdot e^{-\gamma \cdot z} \right] \cdot e^{-z_0 \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot \left(e^{a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} - e^{-a \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \right) \cdot e^{-j(x \cdot \xi + y \cdot \eta)} d\xi d\eta \right] \right] \quad (2)$$

$$\text{де } \gamma = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 - j \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot (v_x \cdot \xi + v_y \cdot \eta)} + j \cdot \omega \cdot \sigma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r$$

$$\lambda_0 = \frac{(\gamma^2 - \mu_r^2 \cdot (\xi^2 + \eta^2)) \cdot (1 - e^{-2 \cdot \gamma \cdot d})}{(\gamma + \mu_r \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2 - (\gamma - \mu_r \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2 \cdot e^{-2 \cdot \gamma \cdot d}}$$

$$\nu_0 = \frac{4 \cdot \mu_r \cdot \gamma \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2} \cdot e^{(\sqrt{\xi^2 + \eta^2} - \gamma) \cdot d}}{(\gamma + \mu_r \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2 - (\gamma - \mu_r \cdot \sqrt{\xi^2 + \eta^2})^2 \cdot e^{-2 \cdot \gamma \cdot d}}$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} - \text{магнітна стала у вакуумі;}$$

$$j = \sqrt{-1}; \xi, \eta - \text{змінні інтегрування.}$$

Розподіл ГВС, отриманий за допомогою «точної» математичної моделі (1), (2), для одинарного рамкового витка зображено на рисунку 1. Розрахунок здійснювався за наступних вихідних даних: $v = (0; 40; 0)$ м/с; $x = -15 \dots 15$ мм, $y = -25 \dots 25$ мм, $a = 16$ мм, $b = 16$ мм; товщина струмопровідного матеріалу $d = 10$ мм; висота розташування центру витка над ОК $z_0 = 19$ мм; зміщення витка від початку координат $x_0 = 0$ мм; електрофізичні параметри матеріалу ОК $\sigma = 7,69 \cdot 10^6$ См/м, $\mu_r = 700$, частота $f = 4$ кГц; струм збудження $I = 1$ А.

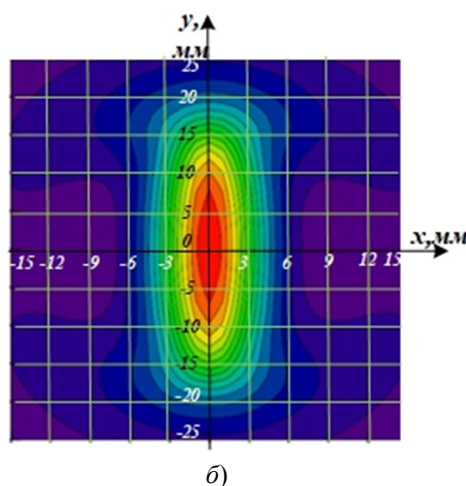
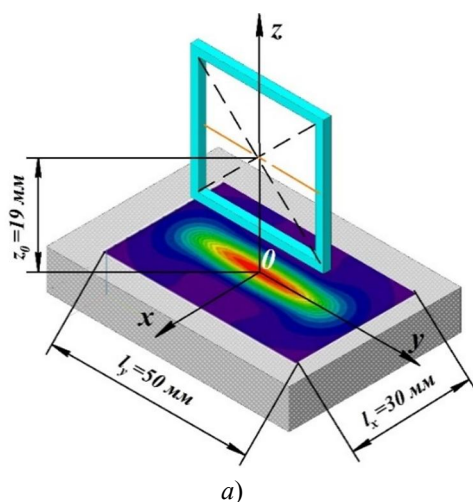


Рисунок 1 – Розподіл ГВС на поверхні ОК, створений одинарним витком прямокутної форми

Для задач дефектометрії ідеальною формою розподілу ГВС є П-подібна, коли спостерігається максимальна його локалізація і сконцентрованість у зоні контролю, тоді як поза її межами розподіл має нульове значення. Тобто розподіл ГВС є однорідним у заданій зоні. На рисунку 2 проілюстровано заданий П-подібний розподіл ГВС в ОК J_{ref} , що описується виразом

$$J_{ref} = \begin{cases} 2,4 \cdot 10^4 \cdot \text{А/м}^2 & \text{при } \begin{cases} 0 < x \leq 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ -12 \cdot 10^{-3} \leq y \leq 12 \cdot 10^{-3} \text{ м} \end{cases} \\ 0 & \text{якщо } x, y \text{ інші} \end{cases}$$

А на рисунку 3 цей же розподіл зображений уздовж осей ОХ та ОУ (графік 1) і для порівняння розподіл ГВС створений одинарним витком з розмірами 16×16 мм (графік 2).

Розподіл ГВС одинарного витка має незначну область однорідності, так, уздовж осі ОХ вона становить близько 1 мм, а вздовж осі ОУ – 8 мм (рисунок 3, а, б). Покращити розподіл ГВС, а саме наблизити його до бажаного однорідного (рисунок 2), можна використанням системи котушок збудження різноманітних структур, як показано авторами на прикладі кругових ВСП [5-8] та рамкових НВСП [11].

Отже, постає задача проектування СЗ рамкового тангенціального НВСП, що забезпечує апіорі заданий однорідний розподіл ГВС у контрольних точках зони ОК.

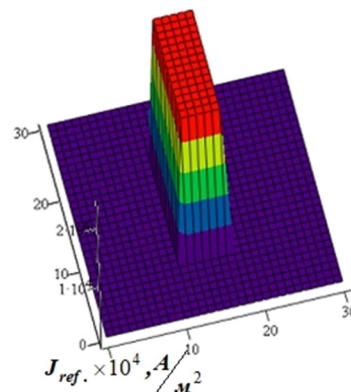
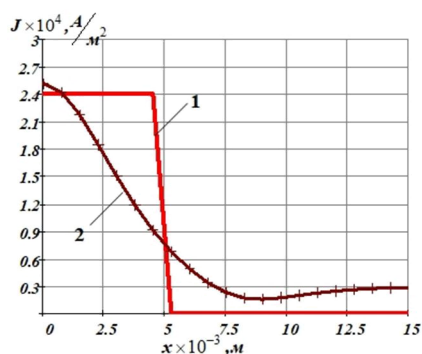
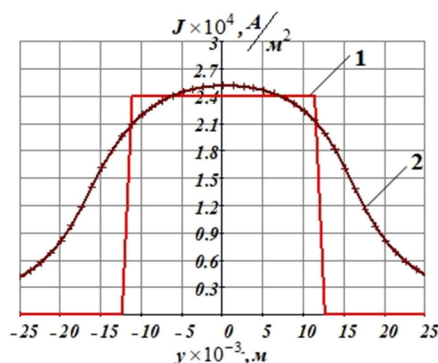


Рисунок 2 – Бажаний розподіл ГВС у зоні контролю



а)



б)

а) вздовж осі ОХ; б) вздовж осі ОУ: 1 – бажаний; 2 – створений одиночним витком прямокутної форми

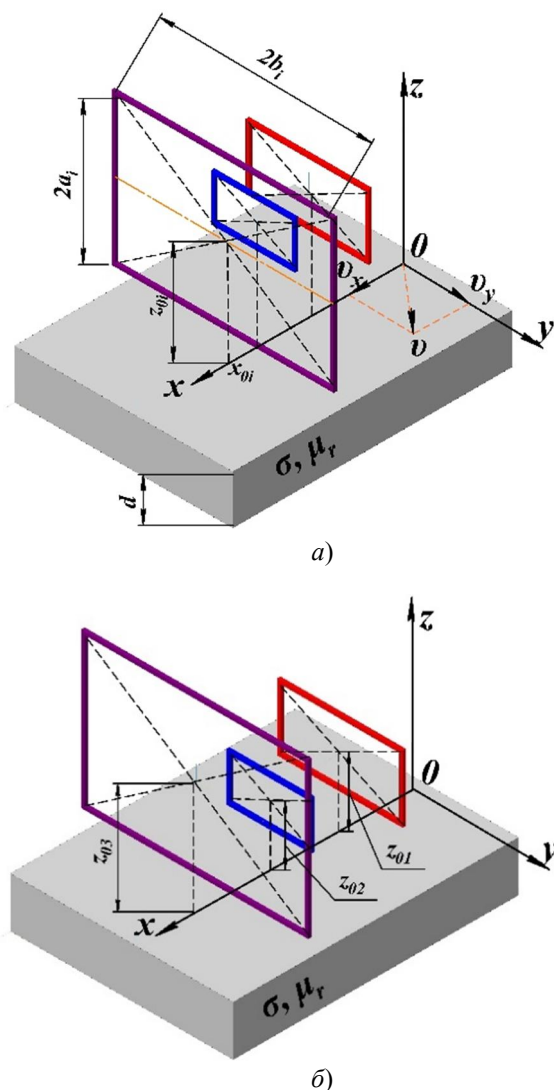
Рисунок 3 – Розподіл ГВС на поверхні ОК

Формулювання задачі синтезу. Розглядатимемо рухомий рамковий тангенціальний НВСП з об'ємною структурою СЗ, яка складається із сукупності M секційних котушок, кожна з яких містить w_i ($i = 1, \dots, M$) витків. Секційні котушки включені послідовно-зустрічно або послідовно-узгоджено та мають різні МРС Iw_i і живляться змінним струмом I круговою частотою ω . Така об'ємна структура СЗ характеризується наявністю секційних котушок з геометричними розмірами сторін $2a_i \times 2b_i$ кожної із них. Їх положення у просторі вздовж осі ОХ визначається величиною x_{0i} від початку системи координат (рисунок 4). Положення секційних котушок визначається також висотами z_{0i} їх розташування над ОК. На рисунку 4, а зображено структуру СЗ, для якої геометричні центри всіх котушок розміщені на однаковій висоті, тобто $z_{0i} = \text{const}$, а на рисунку 4, б – варіант СЗ, коли висота розташування котушок є різною $z_{0i} = \text{var}$. В цьому дослідженні надалі розглядається випадок, коли висота для всіх секцій є сталою і дорівнює z_0 . Для чисельних експе-

риментів використовуватимемо секції квадратної форми.

Задача синтезу сформульована в оптимізаційній постановці [15]. Цільова функція задана у вигляді квадратичного функціоналу, приклади застосування якого для задач синтезу НВСП розглянуто в роботах [14, 7].

Проте розв'язок оптимізаційної задачі із застосуванням «точної» математичної моделі (1), (2) ускладнений її великою обчислювальною ресурсомісткістю. Так, у роботі [16] показано ресурсомісткість розрахунку такої «точної» моделі, яка становить від 7 до 9 годин, що унеможливує безпосереднє її використання в задачах оптимального синтезу. Тому для реалізації задачі оптимального синтезу з метою зменшення ресурсомісткості обчислень застосовується технологія сурогатної оптимізації, основні етапи виконання якої описано в роботах [17-23]. Такий підхід успішно застосовувався для синтезу СЗ кругових НВСП з планарними [6-8] та об'ємними структурами [9, 10] й плоских СЗ прямокутної форми з генеруванням магнітного потоку збудження, нормального до ОК [1, 11].



а) $z_{0i} = \text{const}$; б) $z_{0i} = \text{var}$

Рисунок 4 – Різновиди об'ємних структур СЗ рамкових тангенціальних НВСП

Комп'ютерний план експерименту. Побудова метамоделі. Згідно з алгоритмом сурогатної оптимізації першим етапом є побудова метамоделі СЗ рухомого рамкового тангенціального НВСП. Розподіл ГВС для такої структури СЗ описується багатовимірною апроксимаційною залежністю $\hat{J} = f(x, y, a, x_0)$, де x й y є просторовими координатами на поверхні ОК в зоні контролю (рисунок 4, а).

Нині існує багато відомих підходів до побудови апроксимаційних залежностей. Зазвичай при їх застосуванні необхідно зважати як на переваги, так і на притаманні їм недоліки та враховувати особливості реалізації. Детальний аналіз цих методів розглянуто в оглядовій статті [24]. Широке застосування

в наукових задачах мають евристичні методи на основі штучних нейронних мереж (НМ) на радіально-базисних функціях RBF-ANN [14, 18, 19] та багатопланових перцептронах MLP-ANN [20, 21]. Тому в дослідженні для побудови багатовимірної апроксимаційної залежності, враховуючи переваги та недоліки нейромережових методів, обрано саме RBF-нейронні мережі з ядерною гаусовою функцією активації.

В роботах [5-7, 9-11] було показано, що на основі НМ-технік та із застосуванням гібридного підходу з різноманітними методами підвищення точності вдається отримати багатовимірні метамоделі НВСП із прийнятною похибкою апроксимації. Тому автором продовжено практику гібридного підходу до НМ і для створення метамоделі попередньо здійснено декомпозицію області пошуку на кілька підобластей, в яких застосовано адитивну НМ-регресію із використанням комітетів мереж на кожному рівні.

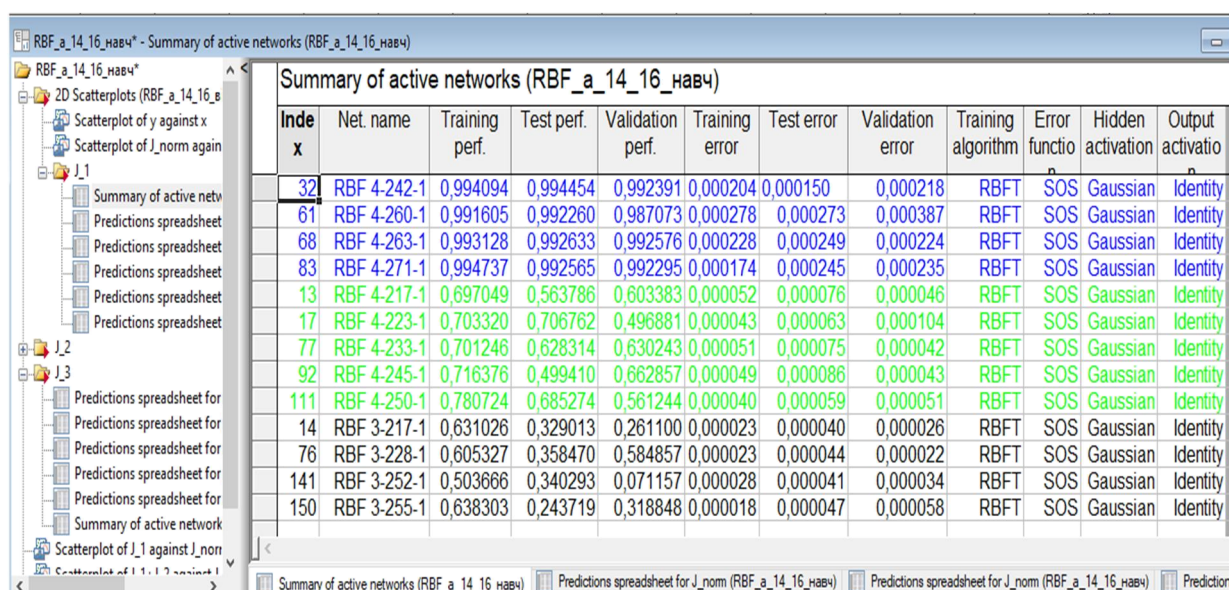
Для побудови метамоделі засобами штучних НМ створюється масив вихідних даних, який отримується розрахунком за «точними» математичними моделями в точках плану експерименту (ПЕ). Оскільки в цьому випадку топологія чотиривимірної поверхні відгуку є вельми складною і не підлягає візуалізації, тому доцільно використовувати комп'ютерні методи заповнення простору пошуку контрольними точками, тобто комп'ютерні плани експерименту (КПЕ). Так, в роботі [25] здійснено дослідження декількох квазिवипадкових послідовностей, які доцільно застосовувати для випадків багатовимірного факторного простору, а саме: комбінації ЛП_т-послідовностей Соболя для три-, чотири- та п'ятивимірних планів, які мають найкращі показники гомогенності та сукупності безпараметричних адитивних рекурсивних одновимірних R-послідовностей Кронекера.

Ефективний чотиривимірний комп'ютерний план експерименту для параметрів, що змінюються в межах: $x = 0 \dots 15$ мм, $y = -25 \dots 25$ мм, $a = 4 \dots 16$ мм, $x_0 = 0 \dots 4$ мм, реалізовано на основі сукупності безпараметричних адитивних рекурсивних одновимірних R-послідовностей за допомогою створеного програмного продукту [26]. Ефективність цього КПЕ підтверджується низькими показниками центрованого $CD_4 = 8,07 \cdot 10^{-5}$ та циклічного $WD_4 = 6,321$ розходжень для кількості точок $N_{\text{навч.}} = 2500$ [25, 26].

Область пошуку за розміром катушки a розділялася на шість декомпозиційних підобластей: $4 \leq a < 6$ мм, $6 \leq a < 8$ мм, $8 \leq a < 10$ мм, $10 \leq a < 12$ мм, $12 \leq a < 14$ мм, $14 \leq a \leq 16$ мм.

Для кожної підобласті в отриманих точках КПЕ розраховується розподіл ГВС за функціональними залежностями (1), (2) за наступних сталих параметрів: $d = 10$ мм, $z_0 = 19$ мм, $\vec{v} = (0,40,0)$ м/с, електрофізичні параметри матеріалу ОК $\sigma = 7.69 \cdot 10^6$ См/м, $\mu_r = 700$, частота $f = 4$ кГц; струм збудження $I = 1$ А.

Надалі застосуванням адитивної НМ-регресії отримано метамоделі для кожної підобласті із наступним об'єднанням отриманих рішень в єдине. Водночас використано кілька методів підвищення точності апроксимаційної моделі, що показали свою ефективність при побудові багатовимірних метамоделей [7, 9-11]. Так, на кожному проміжному рівні адитивної НМ-регресії застосовувався комітет мереж із прийняттям рішення шляхом усереднення за ансамблем тих мереж, що мають найбільшу продуктивність (рисунк 5) [23].



Index	Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training error	Test error	Validation error	Training algorithm	Error function	Hidden activation	Output activation
32	RBF 4-242-1	0.994094	0.994454	0.992391	0.000204	0.000150	0.000218	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
61	RBF 4-260-1	0.991605	0.992260	0.987073	0.000278	0.000273	0.000387	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
68	RBF 4-263-1	0.993128	0.992633	0.992576	0.000228	0.000249	0.000224	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
83	RBF 4-271-1	0.994737	0.992565	0.992295	0.000174	0.000245	0.000235	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
13	RBF 4-217-1	0.697049	0.563786	0.603383	0.000052	0.000076	0.000046	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
17	RBF 4-223-1	0.703320	0.706762	0.496881	0.000043	0.000063	0.000104	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
77	RBF 4-233-1	0.701246	0.628314	0.630243	0.000051	0.000075	0.000042	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
92	RBF 4-245-1	0.716376	0.499410	0.662857	0.000049	0.000086	0.000043	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
111	RBF 4-250-1	0.780724	0.685274	0.561244	0.000040	0.000059	0.000051	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
14	RBF 3-217-1	0.631026	0.329013	0.261100	0.000023	0.000040	0.000026	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
76	RBF 3-228-1	0.605327	0.358470	0.584857	0.000023	0.000044	0.000022	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
141	RBF 3-252-1	0.503666	0.340293	0.071157	0.000028	0.000041	0.000034	RBFT	SOS	Gaussian	Identity
150	RBF 3-255-1	0.638303	0.243719	0.318848	0.000018	0.000047	0.000058	RBFT	SOS	Gaussian	Identity

Рисунок 5 – Показники продуктивності та абсолютної похибки адитивної НМ-регресії для підобласті $14 \leq a \leq 16$ мм

Для утворення комітету НМ відбиралися найкращі мережі за показниками продуктивності, коефіцієнта детермінації R^2 , середньої відносної величини модельної похибки $MAPE$, % і суб'єктивним аналізом діаграм розсіювання та гістограм залишків [18, 27, 28]. Для формування навчальних, тестувальних та контрольних підвибірок застосовується бегінг-процедура. Завдяки такій гібридній побудові адитивної НМ-регресії вдалося отримати значення $MAPE$ для складної топології розподілу ГВС на рівні від 2.14 % до 4 % на етапі її навчання. В таблиці 1 наведено відомості щодо побу-

дови метамоделі для однієї підобласті $14 \leq a \leq 16$ мм. В цій таблиці показано три проміжні рівні адитивної НМ-регресії $J_1 - J_3$, для кожного із яких представлено складові НМ, що відібрані для утворення комітету, а також отримано чисельні значення $MAPE$. Окрім похибки $MAPE$, створені метамоделі оцінювалися за низкою інших статистичних показників – як якісних, так і кількісних [18, 29]. На рисунку 5 наведено НМ, що відібралися для утворення комітету, і чисельні значення продуктивності, абсолютної похибки кожної із них.

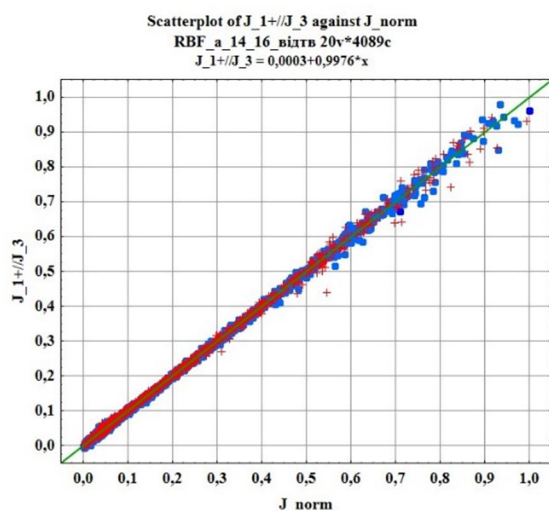
Таблиця 1 – Відомості щодо створення метамоделі квадратного рухомого тангенціального НВСП з об'ємною структурою СЗ для зрізу $14 \leq a \leq 16$ мм на етапах навчання ($N_{навч} = 2050$) та відтворення ($N_{відтв} = 4090$) поверхні відгуку

Рівень НМ-регресії	Нейронні мережі, що є складовими комітетів	MAPE, %	
		Навчання	Відтворення
$\hat{J}_1$	RBF-4-242-1(32)	7,7	7,88
	RBF-4-234-1(16)		
	RBF-4-263-1(68)		
	RBF-4-271-1(83)		
$\hat{J}_2$	RBF-4-223-1(17)	4,98	5,39
	RBF-4-217-1(13)		
	RBF-4-233-1(77)		
	RBF-4-250-1(111)		
	RBF-4-245-1(92)		
$\hat{J}_3$	RBF-4-217-1(14)	4	4,47
	RBF-4-228-1(76)		
	RBF-4-252-1(141)		
	RBF-4-255-1(150)		

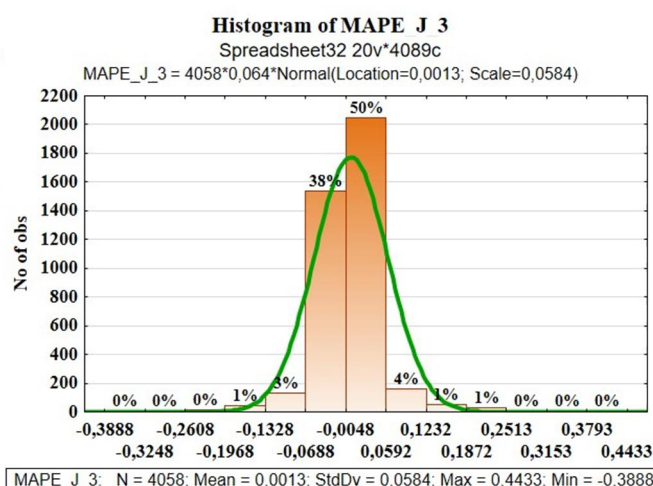
Верифікація створеної метамоделі.

Верифікація метамоделі виконувалася перевіркою правильності відтворення поверхні відгуку в усіх підобластях на вибірці, що має більшу кількість точок $N_{відтв} = 4090$, ніж при навчанні, тобто $N_{відтв} > N_{навч}$. На етапі відтворення поверхні відгуку оцінювалися адекватність отриманої метамоделі за критерієм Фішера та інформативність за коефіцієнтом детермінації [18, 29]. Для ілюстрації адекватності створеної метамоделі на рисунку 6, а

зображено діаграми розсіювання значень чотиривимірної апроксимаційної моделі, а на рисунку 6, б – гістограму розподілу отриманої похибки $MAPE$ у відносних одиницях для однієї з підобластей. На рисунку 7 наведено результат відтворення поверхні відгуку у вигляді ліній рівня для одного узагальненого зрізу поверхні. Для інших підобластей похибка $MAPE$ на етапі відтворення становила від 2,15 % до 2,87 %.



а)



б)

а) діаграма розсіювання; б) гістограма розподілу похибки $MAPE$

Рисунок 6 – Відтворення поверхні відгуку для підобласті $14 \leq a \leq 16$ мм

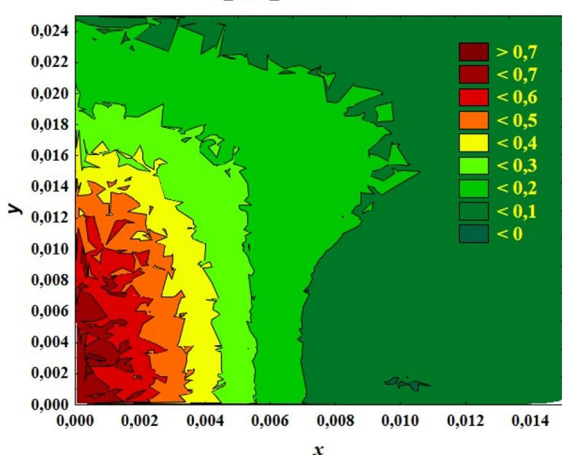
3D Wafer Plot of $J_1 + J_3$ against x and y ; categorized by Subset $J_1 + J_3 = \text{Wafer}$ 

Рисунок 7 – Відтворення чотирирівневої поверхні відгуку у вигляді ліній рівня для узагальненого зрізу поверхні $14 \leq a \leq 15$ мм

Оптимальний сурогатний синтез СЗ.

Надалі розв'язувалася задача лінійного сурогатного оптимального синтезу, де в формулі цільової функції замість «точної» математичної моделі використовувалася отримана RBF-метамодель тангенціального НВСП. Разом з тим, задавався бажаний розподіл ГВС у зоні контролю (рисунки 2, 3), який необхідно отримати в результаті розв'язку задачі.

Для розв'язку нелінійних обернених задач доцільно застосувати стохастичні алгоритми пошуку глобального екстремуму [30, 31]. В цьому дослідженні розв'язок отримано з використанням декількох алгоритмів, один із яких – гібридний алгоритм на основі генетичного з локальним пошуком симплексним методом Нелдера-Міда, другий – алгоритм рою частинок PSO-RND із випадковою стратегією топології зв'язків, наступний – популяційний метаевристичний алгоритм оптимі-

зації роєм частинок з еволюційним формуванням складу рою, що являє собою низькорівневу гібридизацію генетичного алгоритму й алгоритму PSO [30, 31].

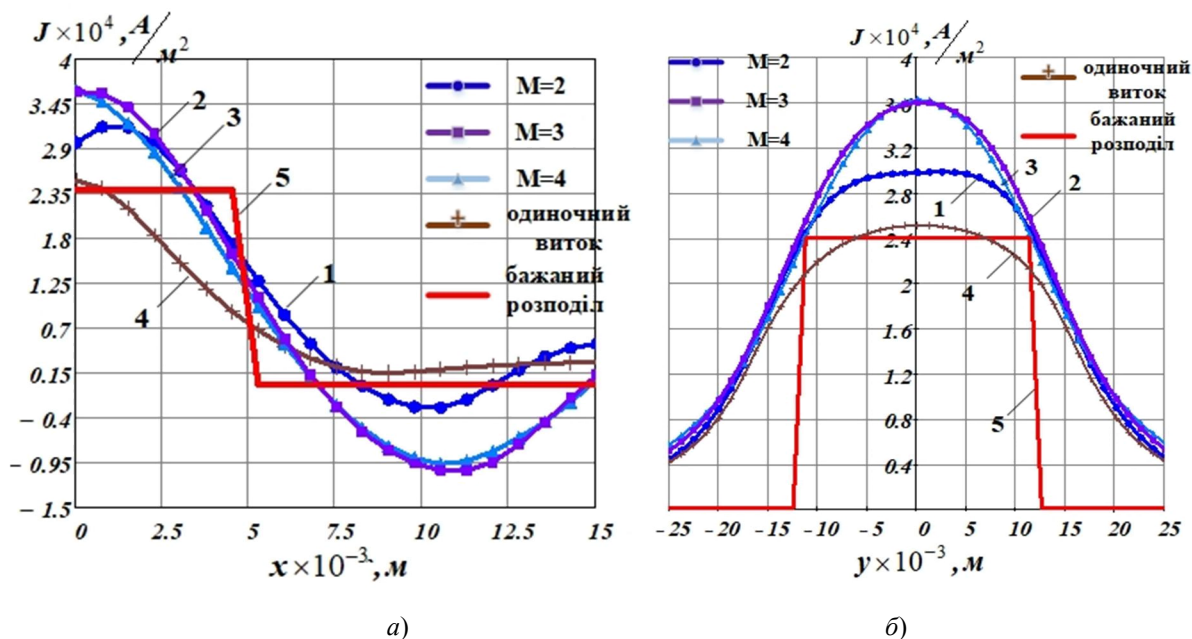
Для того щоб отримати наперед заданий розподіл ГВС у рамках лінійного синтезу, наприклад П-подібний (рисунок 2), необхідно визначити МРС Iw_i для кожної із секційних котушок СЗ за умови відомих координат їх розміщення у просторі та їх заданої кількості M .

Результати досліджень і їх обговорення. Для чисельного моделювання задавалися варіанти об'ємних структур СЗ з різною кількістю квадратних котушок $M = 2 - 4$, відстань між якими є однаковою (рисунок 4, а). Попередній аналіз результатів синтезу дає змогу відібрати декілька структур СЗ, що мають найкращі наближення до однорідного розподілу ГВС. Чисельні результати розв'язку задачі синтезу подано в таблиці 2. Отримані в сукупності параметри забезпечують наближення створеного розподілу ГВС до апіорі заданого П-подібного на поверхні ОК в зоні контролю. В таблиці 2 знак «-» для МРС означає зустрічне включення секційної котушки.

Надалі виконувався розрахунок розподілів ГВС для структури СЗ з отриманими в результаті синтезу параметрами за «точною» електродинамічною моделлю. Результат розрахунку проілюстровано графічно у вигляді зміни розподілу ГВС вздовж осей ОХ та ОУ на рисунку 8, графіки 1–3. Додатково для візуального порівняння там же наведено апіорі заданий розподіл ГВС (графік 5) та розподіл, створений одинарним квадратним витком з розмірами 16×16 мм (графік 4).

Таблиця 2 – Результати сурогатного лінійного синтезу СЗ рамкових рухомих тангенціальних НВСП з різноманітними варіантами об'ємних структур

№ секції	Синтезовані системи збудження								
	M=2			M=3			M=4		
	a , мм	x_0 , мм	Iw , А×витки	a , мм	x_0 , мм	Iw , А×витки	a , мм	x_0 , мм	Iw , А×витки
1	4	0	-39.27	4	0	-92.13	4	3	-75.56
2	14	1	3.9	9	0.5	11.57	8	2	6.94
3				14	1	3.3	12	1	6.46
4							16	0	0.19



а) розподіл ГВС уздовж осі ОХ; б) розподіл ГВС уздовж осі ОУ

Рисунок 8 – Результати синтезу рухомих тангенціальних НВСП з квадратною об’ємною структурою СЗ, обчислені за «точною» електродинамічною моделлю

Отже, всі синтезовані структури СЗ, подані в таблиці 2, реалізують близький до однорідного розподіл ГВС, який перевищує заданий рівень інтенсивності J_{ref} на заданій ділянці $0 < x < 5$ мм та $-12 < y < 12$ мм, що ілюструється рисунком 8. До того ж, порівняння розподілів ГВС, які створюються синтезованими об’ємними структурами СЗ та одинарним витком квадратної форми (рисунок 8, графік 4), безперечно, вказує на те, що всі синтезовані варіанти мають кращі результати. Про це переконливо свідчать графічні залежності 1–3 на рисунку 8.

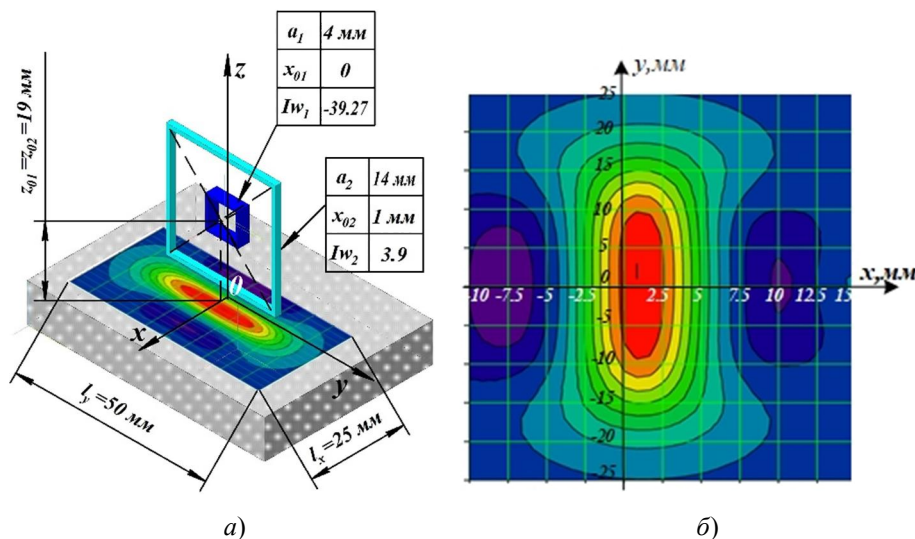
За сумарною кількістю ампер-витків, що необхідні для створення СЗ, структури з $M=3$ та $M=4$ є майже рівнозначними. Однак варіант СЗ з $M=4$ складніший у технологічному сенсі, оскільки він має більшу кількість секцій. За умови майже однакових результатів, щодо забезпечення однорідного розподілу ГВС перевагу варто віддати найпростіший у технічній реалізації структури

СЗ із $M=2$ секційних котушок. На рисунку 9, а зображено загальний вигляд такої об’ємної структури СЗ, а на рисунку 9, б показано у вигляді ліній рівня розподіл ГВС, створений нею.

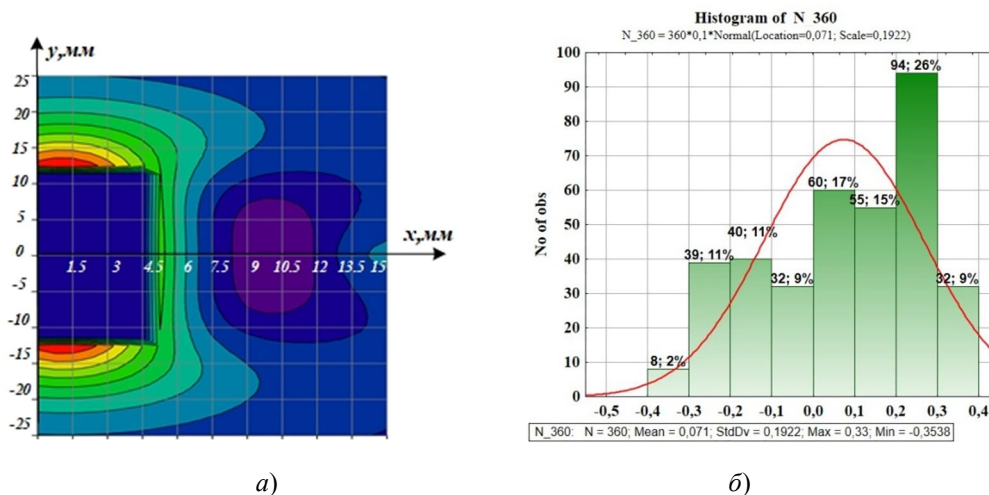
Далі з’ясуємо, наскільки відрізняється розподіл ГВС, створений синтезованою СЗ, від бажаного розподілу ГВС, тобто визначалася відносна похибка синтезу:

$$\delta_i = \frac{J_{i.cumm.} - J_{i.ref.}}{J_{i.ref.}} \cdot 100\%, \text{ де } i = 1 \dots 800.$$

Отримані результати у вигляді ліній рівня розподілу відносної похибки синтезу для структури СЗ із $M=2$ секційних витків зображено на рисунку 10, а, а на рисунку 10, б – гістограми розподілу цієї похибки. Середнє значення похибки синтезу в зоні контролю ОК ($0 < x < 5$ мм та $-12 < y < 12$ мм) для цієї структури СЗ становить 18.04 %, що є прийнятним результатом.



а) загальний вигляд; б) розподіл ГВС, представлений у вигляді ліній рівня

Рисунок 9 – Синтезована об'ємна структура СЗ рамкового тангенціального НВСП із $M = 2$ 

а) лінії рівня розподілу; б) гістограма розподілу

Рисунок 10 – Відносна похибка синтезу

Висновки. Отже, в дослідженні запропоновано методи й алгоритми лінійного сурогатного оптимального параметричного синтезу рамкових рухомих тангенціальних НВСП з об'ємною структурою СЗ, які дають можливість розширити зону з рівномірним розподілом ГВС. У дослідженні чисельними експериментами показано ефективність розв'язку задачі лінійного синтезу рухомого рамкового тангенціального НВСП з об'ємною структурою СЗ. Для її реалізації поетапно виконано декілька взаємопов'язаних задач.

КПЕ чотиривимірного факторного простору реалізовано на основі сукупності безпараметричних адитивних рекурсивних одновимірних R-послідовностей Кронекера.

Завдяки використанню КПЕ з низькими показниками розбіжності відтворення глобальної та локальної поведінки чотиривимірної поверхні відгуку забезпечується найкраще. Для побудови багатовимірної апроксимаційної моделі з урахуванням суттєвої нелінійності та нерегулярної поведінки гіперповерхонь відгуку використано гібридний підхід. Цей підхід передбачає одночасне застосування технологій декомпозиції області пошуку та НМ, які побудовані на техніках асоціативних машин, а також адитивної НМ-регресії. Для підвищення точності адитивної НМ-регресії використано два методи – це усереднення за ансамблем НМ та підсилення шляхом формування підвибірок (бегтінг). Все це та додатко-

ве ускладнення структури адитивної НМ-регресії (застосування комітетів НМ на кожному проміжному рівні апроксимації) дало змогу досягти прийнятної похибки *MAPE* чотиривимірної метамоделі рухомого рамкового тангенціального НВСП як на етапі її навчання, так і на етапі відтворення.

Отримані в цьому дослідженні результати надалі можуть бути використані як початкові при здійсненні процедури нелінійного синтезу. Це дасть можливість уточнити геометричні розміри компонентів структури збудження, що позитивно відіб'ється на похибці однорідного розподілу густини вихрових струмів у зоні контролю.

Список використаних джерел

- [1] A. S. Repelianto, "Development of uniform eddy current probes using multi-excitation coils", Doctoral Dissertation, Graduate School of Media and Information Sciences Yokohama National University, 2020.
- [2] Z. Su, C. Ye, A. Tamburrino, L. Udpa, and S. Udpa, "Optimization of coil design for eddy current testing of multi-layer structures", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 52, no. 1-2, pp. 315-322, 2016.
- [3] Z. Liu, J. Yao, C. He, Z. Li, X. Liu, and B. Wu, "Development of a bidirectional-excitation eddy-current sensor with magnetic shielding: Detection of subsurface defects in stainless steel", *IEEE Sensors J.*, vol. 18, no. 15, pp. 6203-6216, 2018.
- [4] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetskaya, and V. V. Tychkov, "Surface eddy current probes: excitation systems of the optimal electromagnetic field (review)", *Devices and Methods of Measurements*, vol. 11, no. 2, pp. 91-104, 2020.
- [5] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetskaya, and V. V. Tychkov, "Linear synthesis of non-axial surface eddy current probes", *International Journal "NDT Days"*, vol. 2, no. 3, pp. 259-268, 2019.
- [6] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Linear synthesis of uniform anaxial eddy current probes with a volumetric structure of the excitation system", *International Journal "NDT Days"*, vol. 3, no. 4, pp. 184-190, 2020.
- [7] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Non-linear surrogate synthesis of the surface circular eddy current probes", *Przegląd elektrotechniczny*, no. 9, pp. 76-82, 2019.
- [8] Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, та В. В. Тичков, "Оптимальний сурогатний параметричний синтез накладних кругових неспіввісних вихрострумових перетворювачів із рівномірною чутливістю в зоні контролю", *Вісник Херсонського національного технічного університету*, т. 69, № 2, ч. 2, с. 118-125, 2019.
- [9] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, and V. V. Tychkov, "Multiparameter hybrid neural network metamodel of eddy current probes with volumetric structure of excitation system", *International Scientific Journal "Mathematical Modeling"*, vol. 3, no. 4, pp. 113-116, 2019.
- [10] Р. В. Трембовецкая, В. Я. Гальченко, В. В. Тычков, и А. В. Сторчак, "Линейный синтез анаксиальных однородных вихретоковых преобразователей с объемной структурой системы возбуждения", *International Journal "NDT Days"*, т. 3, № 4, с. 184-190, 2020.
- [11] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov, and C. V. Bazilo, "Linear synthesis of frame eddy current probes with a planar excitation system", *International Scientific Journal "Mathematical Modeling"*, vol. 4, no. 3, pp. 86-90, 2020.
- [12] L. Huang, J. Zou, J. Zhang, Y. Zhou, and F. Deng, "A novel rectangular vertical probe with a conductive shell for eddy current testing", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 62, no. 1, pp. 191-205, 2019.
- [13] T. Itaya, K. Ishida, Y. Kubota, A. Tanaka, and N. Takehira, "Visualization of eddy current distributions for arbitrarily shaped coils parallel to a moving conductor slab", *Progress in Electromagnetics Research M*, vol. 47, pp. 1-12, 2016.
- [14] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "Development of excitation structure RBF-metamodels of moving concentric eddy current probe", *Electrical engineering & electromechanics*, no. 2, pp. 28-38, 2019.
- [15] В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, та В. В. Тичков, "Оптимальне проектування вихрострумових перетворювачів та аналіз методів розв'язку нелінійних оберне-

- них задач", *Прикладні питання математичного моделювання*, т. 3, № 2.2, с. 93-104, 2020.
- [16] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, and V. V. Tychkov, "Studying the computational resource demands of mathematical models for moving surface eddy current probes for synthesis problems", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 95, no. 5/5, pp. 39-46, 2018.
- [17] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "The RBF-metamodel development of surface eddy-current probe for the surrogate optimal synthesis problem", *International Journal "NDT Days"*, vol. 1, no. 4, pp. 425-433, 2018.
- [18] В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, та В. В. Тичков, "Застосування нейрокомп'ютинга на етапі побудови метамodelей в процесі оптимального сурогатного синтезу антен", *Вісник НТУУ "КПІ". Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*, № 74, с. 60-72, 2018.
- [19] В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, та В. В. Тичков, "Нейромережева метамodelь циліндричного накладного вихрострумowego перетворювача як складова сурогатного оптимального синтезу", *Вісник Херсонського національного технічного університету*, т. 66, № 3, ч. 1, с. 32-38, 2018.
- [20] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, and V. V. Tychkov, "The MLP-metamodels application in the surrogate optimization tasks", *Young Scientist*, vol. 6, no. 2, pp. 32-39, 2018.
- [21] Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, та В. В. Тичков, "Побудова MLP-метамodelі накладного вихрострумowego перетворювача для задач сурогатного оптимального синтезу", *Технічні вісті*, т. 47, № 1, т. 48, № 2, с. 27-31, 2018.
- [22] В. Я. Гальченко, В. В. Тичков, А. В. Сторчак, та Р. В. Трембовецька, "Відновлення приповерхневих радіальних профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів при вихрострумowych вимірюваннях із наявністю апіорних даних. Формування вибірки для побудови сурогатної моделі", *Український метрологічний журнал*, № 1, с. 35-50, 2020.
- [23] В. Я. Гальченко, А. В. Сторчак, В. В. Тичков, та Р. В. Трембовецька, "Створення сурогатної моделі для відновлення приповерхневих профілів електрофізичних характеристик циліндричних об'єктів", *Український метрологічний журнал*, № 3, с. 27-35, 2020.
- [24] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Methods for creating metamodels: state of the question", *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, vol. 151, no. 4, pp. 74-88, 2020.
- [25] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "The construction of effective multidimensional computer designs of experiments based on a quasi-random additive recursive Rd-sequence", *Applied Computer Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 70-76, 2020.
- [26] В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, та В. В. Тичков, "Програма створення багатовимірного комп'ютерного однорідного плану експерименту на основі R-последовательностей", *Свідомство 102018 України про реєстрацію авторського права на твір*, № 103492; заявл. 24.12.20; зареєстр. 25.01.21 в Держ. реєстрі свідомств про реєстрацію авторського права на твір.
- [27] Р. В. Трембовецька, В. Я. Гальченко, В. В. Тичков, та А. В. Сторчак, "Оцінка точності нейромережевих метамodelей кругових накладних вихрострумowych перетворювачів", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 18-29, 2019.
- [28] M. Elsayah, *Constructing uniform experimental designs: in view of centered and wrap-around discrepancy*, LAP LAMBERT Academic Publishing: (Theory of probability, stochastics, mathematical statistics), 2014.
- [29] H. Brink, J. Richards, and M. Feverolph, *Machine learning*, St. Petersburg, Russia: Peter, 2017.
- [30] V. Ya. Halchenko, A. N. Yakimov, and D. L. Ostapuschenko, "Global optimum search of functions with using of multiagent swarm optimization hybrid with evolutionary composition formation of population", *Information technology*, no. 10, pp. 9-16, 2010.
- [31] V. Ya. Halchenko, A. N. Yakimov, and D. L. Ostapuschenko, "Method of Pareto-optimal parametric synthesis of axially symmetric magnetic systems taking into account the nonlinear magnetic properties of a ferromagnetic", *Journal of Technical Physics*, no. 7, pp. 1-7, 2012.

References

- [1] S. Repelianto, "Development of uniform eddy current probes using multi-excitation coils", Doctoral Dissertation, Graduate School of Media and Information Sciences Yokohama National University, 2020.
- [2] Z. Su, C. Ye, A. Tamburrino, L. Udpa, and S. Udpa, "Optimization of coil design for eddy current testing of multi-layer structures", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 52, no. 1-2, pp. 315-322, 2016.
- [3] Z. Liu, J. Yao, C. He, Z. Li, X. Liu, and B. Wu, "Development of a bidirectional-excitation eddy-current sensor with magnetic shielding: Detection of subsurface defects in stainless steel", *IEEE Sensors J.*, vol. 18, no. 15, pp. 6203-6216, 2018.
- [4] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetskaya, and V. V. Tychkov, "Surface eddy current probes: excitation systems of the optimal electromagnetic field (review)", *Devices and Methods of Measurements*, vol. 11, no. 2, pp. 91-104, 2020.
- [5] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetskaya, and V. V. Tychkov, "Linear synthesis of non-axial surface eddy current probes", *International Journal "NDT Days"*, vol. 2, no. 3, pp. 259-268, 2019.
- [6] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Linear synthesis of uniform anaxial eddy current probes with a volumetric structure of the excitation system", *International Journal "NDT Days"*, vol. 3, no. 4, pp. 184-190, 2020.
- [7] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Non-linear surrogate synthesis of the surface circular eddy current probes", *Przegląd elektrotechniczny*, no. 9, pp. 76-82, 2019.
- [8] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, and V. V. Tychkov, "Optimal surrogate parametric synthesis of surface circular nonaxial eddy-current probes with uniform sensitivity in the testing zone", *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, vol. 69, no. 2 (2), pp. 118-125, 2019 [in Ukrainian].
- [9] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, and V. V. Tychkov, "Multiparameter hybrid neural network metamodel of eddy current probes with volumetric structure of excitation system", *International Scientific Journal "Mathematical Modeling"*, vol. 3, no. 4, pp. 113-116, 2019.
- [10] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Linear synthesis of uniform anaxial eddy current probes with a volumetric structure of the excitation system", *International Journal "NDT Days"*, vol. 3, no. 4, pp. 184-190, 2020 [in Russian].
- [11] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov, and C. V. Bazilo, "Linear synthesis of frame eddy current probes with a planar excitation system", *International Scientific Journal "Mathematical Modeling"*, vol. 4, no. 3, pp. 86-90, 2020.
- [12] L. Huang, J. Zou, J. Zhang, Y. Zhou, and F. Deng, "A novel rectangular vertical probe with a conductive shell for eddy current testing", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 62, no. 1, pp. 191-205, 2019.
- [13] T. Itaya, K. Ishida, Y. Kubota, A. Tanaka, and N. Takehira, "Visualization of eddy current distributions for arbitrarily shaped coils parallel to a moving conductor slab", *Progress in Electromagnetics Research M*, vol. 47, pp. 1-12, 2016.
- [14] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "Development of excitation structure RBF-metamodels of moving concentric eddy current probe", *Electrical engineering & electromechanics*, no. 2, pp. 28-38, 2019.
- [15] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "Optimal design of eddy current probes and analysis of methods for solutions of nonlinear inverse problems", *Prykladni pytannia matematychnoho modeluvannia*, vol. 3, no. 2.2, pp. 93-104, 2020 [in Ukrainian].
- [16] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, and V. V. Tychkov, "Studying the computational resource demands of mathematical models for moving surface eddy current probes for synthesis problems", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 95, no. 5/5, pp. 39-46, 2018.
- [17] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "The RBF-metamodel

- development of surface eddy-current probe for the surrogate optimal synthesis problem", *International Journal "NDT Days"*, vol. 1, no. 4, pp. 425-433, 2018.
- [18] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "The use of neurocomputing at the stage of metamodels development in the process of optimal surrogate antennas synthesis", *Visnyk NTUU «KPI». Seriya Radiotekhnika. Radioaparaturbuduvannia*, no. 74, pp. 60-72, 2018 [in Ukrainian].
- [19] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "Neuro-network metamodel of cylindrical eddy-current probe as a surrogate optimum synthesis component", *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, vol. 66, no. 3 (1), pp. 32-38, 2018.
- [20] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, and V. V. Tychkov, "The MLP-metamodels application in the surrogate optimization tasks", *Young Scientist*, vol. 6, no. 2, pp. 32-39, 2018.
- [21] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, and V. V. Tychkov, "Design of an MLP-metamodel of a surface eddy-current probe for problems of surrogate optimal synthesis", *Tekhnichni visti*, vol. 47, no. 1, vol. 48, no. 2, pp. 27-31, 2018 [in Ukrainian].
- [22] V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov, A. V. Storchak, and R. V. Trembovetska, "Reconstruction of surface radial profiles of electrophysical characteristics of cylindrical objects during eddy current measurements with a priori data. The selection formation for the surrogate model construction", *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*, no. 1, pp. 35-50, 2020 [in Ukrainian].
- [23] V. Ya. Halchenko, A. V. Storchak, V. V. Tychkov, and R. V. Trembovetska, "The creation of a surrogate model for restoring surface profiles of electrophysical characteristics of cylindrical objects", *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*, no. 3, pp. 27-35, 2020 [in Ukrainian].
- [24] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Methods for creating metamodels: state of the question", *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, vol. 151, no. 4, pp. 74-88, 2020.
- [25] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "The construction of effective multidimensional computer designs of experiments based on a quasi-random additive recursive Rd-sequence", *Applied Computer Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 70-76, 2020.
- [26] V. Ya. Halchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "Program for creating a multidimensional computer homogeneous experimental plan based on R-sequences"; *Certificate 102018 Ukraine on the registration of copyright for an official work № 103492*; declared 24.12.20; registered on 25.01.21 in the State Register of copyright registration certificates for the work [in Ukrainian].
- [27] R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov, and A. V. Storchak, "Estimation of accuracy of neuro-network metamodels of surface eddy current probes", *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*, no. 2, pp. 18-29, 2019 [in Ukrainian].
- [28] M. El Sawah, *Constructing uniform experimental designs: in view of centered and wrap-around discrepancy*, LAP LAMBERT Academic Publishing: (Theory of probability, stochastics, mathematical statistics), 2014.
- [29] H. Brink, J. Richards, and M. Feverolph, *Machine learning*, St. Petersburg, Russia: Peter, 2017.
- [30] V. Ya. Halchenko, A. N. Yakimov, and D. L. Ostapuschenko, "Global optimum search of functions with using of multiagent swarm optimization hybrid with evolutionary composition formation of population", *Information technology*, no. 10, pp. 9-16, 2010.
- [31] V. Ya. Halchenko, A. N. Yakimov, and D. L. Ostapuschenko, "Method of Pareto-optimal parametric synthesis of axially symmetric magnetic systems taking into account the nonlinear magnetic properties of a ferromagnetic", *Journal of Technical Physics*, no. 7, pp. 1-7, 2012.

R. V. Trembovetska, *Cand. of Tech. Sciences, associate professor*,
e-mail: r.trembovetska@chdtu.edu.ua

V. Ya. Halchenko, *Doctor of Tech. Sciences, professor*,
V. V. Tychkov, *Cand. of Tech. Sciences, associate professor*
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

LINEAR SURROGATE SYNTHESIS OF FRAME TANGENTIAL EDDY CURRENT PROBES WITH A VOLUMETRIC STRUCTURE OF THE EXCITATION SYSTEM

A mathematical method of linear surrogate parametric synthesis of frame tangential eddy current probes with a three-dimensional structure of the excitation system is proposed, which provides a uniform eddy current density distribution in the testing object zone. To achieve optimal synthesis, several interrelated tasks are performed in stages.

Thus, the design of experiment (DOE) for four-dimensional factor space is proposed to be realized on the basis of a set of nonparametric additive recursive one-dimensional Kronecker's R-sequences. The use of DOEs with low discrepancies best reproduces the global and local behavior of the four-dimensional response surface. Given the significant nonlinearity and irregular behavior of the response hypersurface, a hybrid approach has been used to design a multidimensional approximation model. This approach involves the simultaneous use of decomposition technologies of the search area and neural network (NN), which are based on the techniques of associative machines, as well as additive NN-regression. To increase the accuracy of additive NN-regression, several methods, namely averaging over the NN ensemble and amplification by forming subsamples (begging), have been used. All this and the additional complication of the structure of additive NN-regression, namely the use of NN committees at each intermediate level of approximation, have allowed to achieve an acceptable MAPE error of a four-dimensional metamodel of a moving frame tangential SECP with a three-dimensional excitation system, both at the stage of training and at the stage of reproduction. The paper presents numerical results and graphical material that illustrates the adequacy and informativeness of the obtained metamodel.

An example of synthesis of such excitation systems using modern metaheuristic stochastic algorithms for finding the global extremum is considered. Numerical results of the obtained solution and graphical illustrative material of the eddy current density distribution on the surface in the testing object zone are given. The proposed methods and algorithms of linear surrogate optimal parametric synthesis allow to obtain acceptable accuracy of synthesis in the testing area of the frame tangential SECP with the three-dimensional structure of the excitation system.

Keywords: *frame tangential eddy current probe, volumetric structure of excitation system, eddy current density, uniform sensitivity, additive neural network regression.*

УДК 621.384.4

[0000-0001-5910-5921] **С. В. Гайдукевич**, старший викладач,
e-mail: SoleykoS@i.ua

[0000-0002-8478-9429] **Н. П. Семенова**, старший викладач,
e-mail: 0677524248@ukr.net

[0000-0001-9400-5491] **Я. А. Леськів**, магістр
e-mail: yaroslav.leskiv@gmail.com

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів
і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»
вул. Академічна, 20, Тернопільська обл., м. Бережани, 47501, Україна

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯМ У СПОРУДАХ ЗАКРИТОГО ҐРУНТУ

Розроблено і виготовлено на базі мікроконтролера ATmega328 автоматичну систему керування, яка призначена для підвищення ефективності функціонування теплиці за рахунок моніторингу мікрокліматичних параметрів та обробки даних, що дає змогу контролювати та своєчасно усувати відхилення параметрів, спричинені різноманітними збурюючими діями, від встановлених значень з метою створення сприятливих умов для проростання та життєдіяльності рослин.

В результаті досліджень встановлено, що запропонована розробка дає можливість підвищити надійність роботи електрообладнання під час експлуатації, вдосконалити наявні механізми в результаті досягнення бажаного алгоритму, тобто наблизити процеси до стану оптимального балансу та зекономити витрату теплової енергії на 10 %, тим самим зменшити енергоспоживання та підвищити продуктивність.

Ключові слова: автоматична система керування, мікроклімат, теплиця, мікропроцесор, функціонування.

Вступ. У спорудах захищеного ґрунту незалежно від змін зовнішнього середовища необхідно створювати сприятливі умови для вирощування рослин. Тому мікрокліматичні параметри повинні суворо контролюватися, знаходитися в обмежених зонах і безпосередньо враховуватися при автоматизації технологічних процесів.

Фактори, які потрібні для ефективного вирощування овочевих культур та інших рослин, вимагають автоматизації підтримки оптимальної температури і вологості повітря та ґрунту, забезпечення приміщень закритого ґрунту достатньою освітленістю та відповідною кількістю CO₂. Тому проста автоматика, яка складається з реле часу і терморегулятора, на сьогоднішній день не задовольняє агропромислові вимоги, адже через великі втрати електроенергії сільськогосподарські підприємства стають нерентабельними.

З появою різноманітних технічних засобів та інженерних систем у приміщеннях за-

критого ґрунту підвищуються вимоги до якості підтримки мікроклімату. А це, в свою чергу, накладає високі вимоги до функціонування та технічного вдосконалення апаратного забезпечення систем керування [1], оскільки в застарілих системах автоматичного керування динамічні і статичні характеристики багатьох елементів і технологічних вузлів теплиці суттєво ускладнюють завдання якісного управління технологічними процесами [2], що зумовлює потребу у пошуку нових шляхів підвищення ефективності [3]. Водночас необхідно враховувати впливи зовнішніх і внутрішніх збурень, а це є досить складною задачею.

На сьогоднішній день існує дуже багато різноманітних автоматичних систем, які застосовуються для автоматизації технологічних процесів, що допомагають вирощуванню сільськогосподарської продукції у закритому ґрунті. Всі вони мають свої переваги і недоліки. Однак одним із таких недоліків є їх велика вартість, тому що автоматизація теплиці відно-

ситься до дорогих і не завжди самоокупних заходів. І не всі господарства мають спроможність вкладати кошти в сучасні автоматичні системи. Тому питання побудови ефективних і недорогих систем автоматизації для теплиць [4] залишається невирішеним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний внесок у розробку алгоритмів керування мікрокліматом захищеного ґрунту провели такі вчені, як акад. І. Ф. Бородін, акад. І. І. Мартиненко, акад. Л. Г. Прищеп, проф. В. П. Лисенко та ін.

У своїх працях науковці Т. О. Прокопенко, О. М. Євсеєнко, А. П. Ладанюк, Н. А. Заєць, О. Є. Білас та ін. вказують шляхи та методи використання інтелектуальних технологій, що пропонують суттєве спрощення систем автоматичного керування.

Крім того, багато пропозицій з використання автоматичних систем підтримання оптимального мікроклімату захищеного ґрунту можна знайти в Internet-мережі.

В проаналізованих працях [5–8] у режим мікроклімату переважно включаються чотири показники, такі як: температура повітря, вологість, кількість світла і рівень вуглекислого газу. Для керування цими параметрами пропонується обладнувати теплиці відповідними виконавчими системами: системою опалення, вентиляції, опромінення рослин, системою підживлення CO₂. Запропоновані системи не тільки підтримують основні показники мікроклімату, але й дають змогу контролювати розширений набір показників, таких як температуру листа, вологість листа, розподіл температури повітря по вертикальному зрізу теплиці, швидкість руху повітря і т. д. [9].

Проте системи контролю і керування мікрокліматичними параметрами, які здатні функціонувати в режимі інформаційної невизначеності, майже не вивчені, а ті, що запропоновані, мають дуже велику вартість. Тому розробка і виготовлення доступної та інтелектуальної системи має велике значення в тепличному господарстві. І на сьогоднішній день, в умовах розвалу, економічної кризи і підвищення цін, це є найактуальнішою темою, що істотно зменшує ризик інвестицій у сучасне тепличне господарство.

Мета дослідження – підвищення ефективності функціонування теплиці за рахунок розробки автоматичної системи керування та

автоматизації електрообладнання для підтримання мікрокліматичних параметрів у приміщеннях закритого ґрунту.

Виклад основного матеріалу. Оскільки мікроклімат у теплиці залежить від зовнішніх (вологість повітря, зовнішня температура, сила вітру, сонячне освітлення), експлуатаційних (маса повітря, маса ґрунту) і конструкторських факторів впливу [10], характеризується нездовільною динамікою і нестабільністю параметрів [11], то на етапі проектування системи досить складно вибрати єдиний критерій керування [12]. Враховуючи всі ці збудуючі фактори, було поставлено завдання охопити всі етапи інтеграції процесів теплиці і, таким чином, дати можливість малозабезпеченим тепличним господарствам реалізувати інноваційні проекти [13], тим самим зменшити витрати на виробництво сільськогосподарської продукції. Враховуючи складність процесу оптимізації мікроклімату [14], для реалізації мети було знайдено комплексний підхід, який дає можливість одночасно моніторити всі показники мікроклімату приміщень закритого ґрунту, адже продуктивність залежить від збалансованості всіх процесів. Таким чином, у лабораторії «Електротехнології» було розроблено і виготовлено систему автоматичного керування технологічними процесами теплиці, яка складається з пристрою, програмного забезпечення і включає комп'ютерну техніку.

Робота і керування розробленим та виготовленим пристроєм автоматичного регулювання, що забезпечує необхідну точність параметрів мікроклімату захищеного ґрунту, базуються на застосуванні апаратно-обчислювальної платформи Arduino на основі мікроконтролера ATmega328 (datasheet). Мікроконтролер, що є центром керування всіма процесами і базою для корегування параметрів, адаптований для використання з макетної плати. В цьому випадку Arduino Nano припаяно до макетної плати, яка була замовлена та виготовлена на заводі JLCPCB за власним проектом студента Я. А. Леськів, що був розроблений у форматі Gerber.

Було розроблено два індивідуальні сайти:

1) <https://sites.google.com/view/control-board>, де подається конкретна інформація про сам пристрій, його роботу, монтаж, налаштування, програмне забезпечення і де

можна придбати необхідні компоненти для виготовлення такого автоматичного пристрою керування;

2) <https://photos.app.goo.gl/cyj2ShkusbfQeBReA>, де представлено фотографії і відео з монтажу розробленого пристрою.

Цей пристрій дає можливість провести автоматизацію обладнання теплиці, а також

піддавати оптимізації інші виробничі приміщення, де необхідно створювати оптимальний мікроклімат, витрачаючи мінімальні капіталовкладення, оскільки він зібраний з недорогих китайських компонентів, які легко можна придбати в інтернет-магазинах.

Принципову електричну схему зображено на рисунку 1.

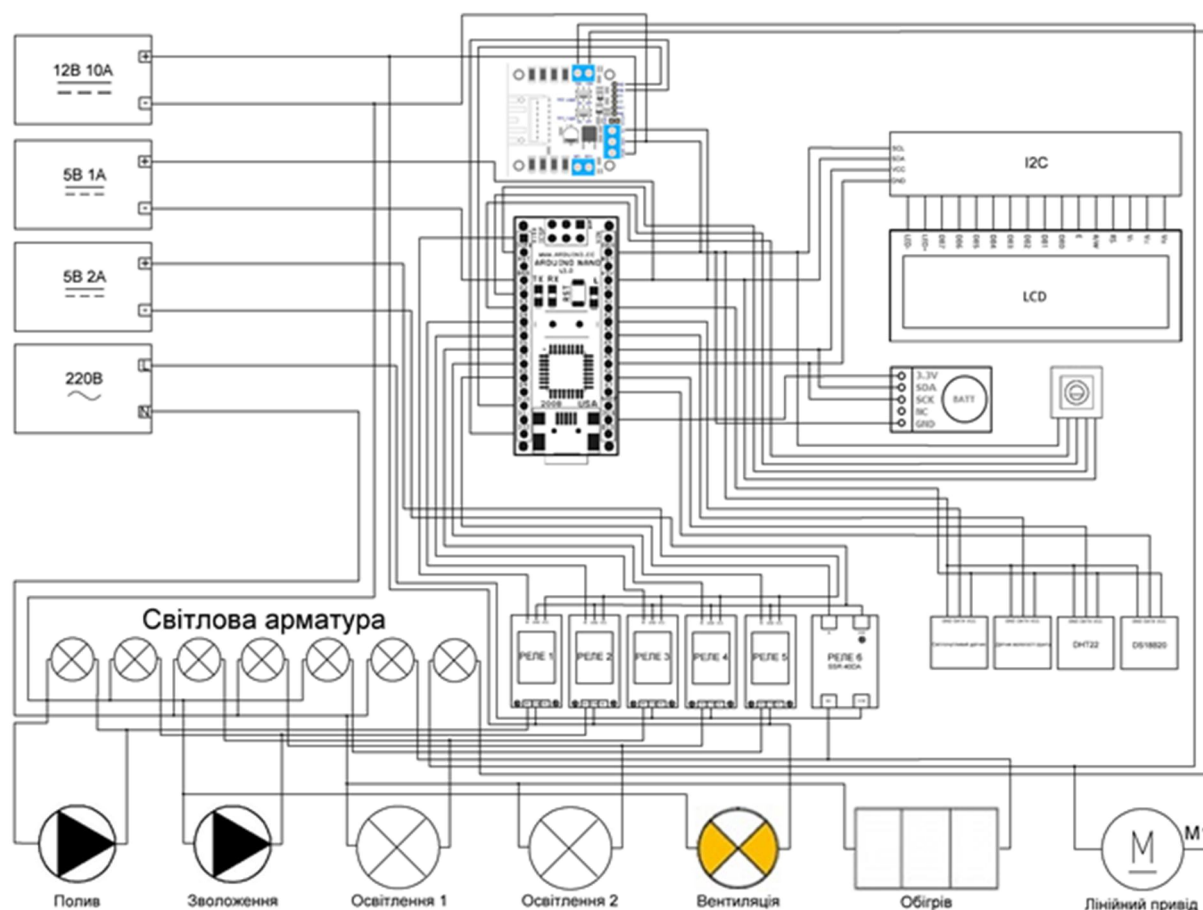


Рисунок 1 – Принципова електрична схема

У цьому пристрої використовується алгоритм зворотного зв'язку. Тобто вся інформація про об'єкт керування одержується датчиками і передається на виконавчі механізми.

Пристрій складається з:

- корпусу, в якому монтуються всі компоненти;

- сигнальної арматури типу AD16DS LED (рисунок 2, в), що призначена для індикації роботи каналів (1 – помпа для системи поливу ґрунту; 2 – помпа для системи туманоутворення; 3 – система освітлення; 4 – система доосвічування (фітолампи); 5 – система вентиляювання; 6 – система обігріву; 7 – лінійний актуатор для закривання і відкривання фрамуги з кінцевими вимикачами для обмеження руху і з роботою по тайм-ауту);

ноутворення; 3 – система освітлення; 4 – система доосвічування (фітолампи); 5 – система вентиляювання; 6 – система обігріву; 7 – лінійний актуатор для закривання і відкривання фрамуги з кінцевими вимикачами для обмеження руху і з роботою по тайм-ауту);

- повнофункціонального мініатюрного пристрою Arduino Nano з мікроконтролером ATmega 328p, що має 10 каналів, до яких підключено 7 реле, 2 модельні сервоприводи та 1 лінійний привід.



Рисунок 2 – Загальний вигляд розробленого і виготовленого пристрою

Кожен із цих каналів має індивідуальне налаштування і може працювати по таймеру або за допомогою відповідних датчиків. Можна налаштувати 4-6 режимів роботи, використовуючи три різні таймери або відповідні датчики:

- макетна плата (рисунок 2, б);
- енкодер, що є органом керування, за допомогою якого виконуються всі налаштування;
- дисплей (LCD 2004, 20 стовпців, 4 рядки), який відображає всю поточну інформацію;
- модуль реального часу RTC DS3231 з автономним живленням;
- модуль драйвера, що здійснює керування двома колекторними двигунами, побудований на мікросхемі TB6612FNG;
- комбінований датчик температури і вологості повітря DHT21 / AM2301;
- цифровий датчик вологості ґрунту, який побудований на основі мікросхеми LM393;
- датчик температури ґрунту DS18B20;
- датчик освітлення з пороговим компаратором LM393;
- 5 реле типу JQC-3FF-S-Z на 12 В і 1 твердотільне реле типу SSR-40D;
- блок живлення логіки контролера на 5 В, 1 А;
- блок живлення сервоприводу, реле і датчиків на 5 В, 2 А;
- блок живлення вентилятора, лінійного приводу на 12 В, 3 А.

Виконавчі механізми:

- помпа системи поливу;
- помпа системи туманоутворення;
- припливний і витяжний вентилятори;
- освітлювальна установка;
- установка для створення різного спектра освітлення (фітолампи);
- електрокалорифер;
- актуатор для відкривання і закривання фрамуги.

Запропонований багатофункціональний універсальний пристрій дає змогу виконувати наступні функції (рисунок 3):

- Зберігати всі налаштування в незалежній пам'яті. Тобто при перезавантаженні налаштування не скидаються.
- За допомогою системного таймера (модуль реального часу) створювати відлік локального часу, який зберігається тривалий час при відключенні основного живлення, використовуючи резервне живлення (батарея CR2032). Це необхідно для відстежування параметрів керування системою та визначення часу доби.
- За датчиком температури і вологості або таймером виконувати провітрювання приміщення.

Вентиляція повітря стабілізує параметри мікроклімату та нормалізує його по вуглекислому газу. Для вентиляції приміщення використовуються припливний і витяжний вентилятори. Припливний вентилятор розташовується у верхній частині стіни для того, щоб у зимовий період часу не створювати про-

тягів. Витяжний вентилятор створює систему рециркуляції повітря і знижує вологість. Для кожного виду рослин необхідно підтримувати відповідну вологість, тому що при перевищенні температури і зниженні вологості нижче нормуючих значень ріст рослин призупиняється, а перевищення норм обох показників призводить до захворювання рослин. Вентилювання повітря в приміщенні закритого ґрунту створюється ще за допомогою фрамуг, які

знаходяться в покрівлі. Відкривання і закривання фрамуг здійснюється за допомогою актуатора. Актуатори можна ще використовувати з датчиком, який визначає напрям вітру, щоб не зашкодити рослинам, але нині датчик вітру в нас не передбачено. Робота фрамуг використовується переважно для регулювання температури і вологості приміщення в літній період часу.

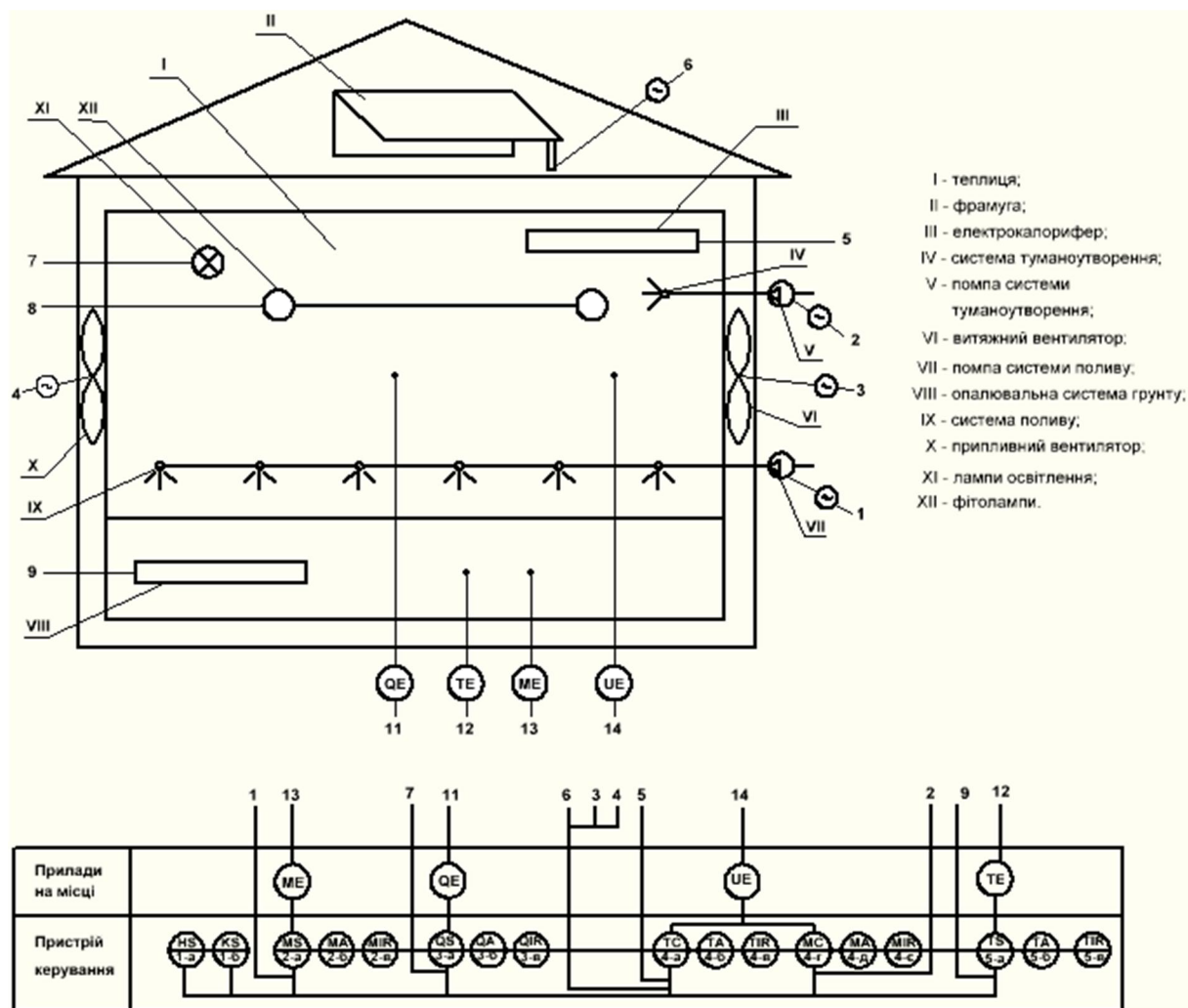


Рисунок 3 – Функціонально-технологічна схема

• Регулювати температуру повітря та ґрунту. Регулювання температури повітря і ґрунту здійснюється за допомогою датчиків, які контролюють температуру в приміщенні та ґрунту. Створювати оптимальну температуру в приміщенні закритого ґрунту можна за допомогою різних установок, наприклад таких, як теплогенератори, водяні калорифери, водяне опалення, електрокалорифери та ін.

Для генерування тепла в певний момент вибрано електрокалорифер. Оператор на дисплеї у вигляді графіків одержує інформацію про покази датчиків протягом заданого періоду. Діапазон температури повітря можна регулювати в широких межах залежно від виду вирощуваної культури і призначення. Обігрів ґрунту виконується стальним оцинкованим дротом, що прокладений під шаром ґрунту.

Можна ще використовувати проводи ПОСХВ, ПОСХВТ або ПОСХП.

• Створювати полив ґрунту. Полив ґрунту контролюється за допомогою датчика вологості, який знаходиться безпосередньо в ґрунті, де ростуть рослини. Полив виконується системою зрошення – повільний, рівномірний, за принципом дощування, що сприяє зростанню рослин. Для підживлення рослин можна розробляти живильні розчини і ними поливати рослини.

• Зволожувати повітря. Для контролювання вологості й одночасно зниження температури повітря використовується система туманоутворення. Ввімкнення установки для створення водяного туману здійснюється за допомогою комбінованого датчика, що вимірює температуру і вологість у приміщенні.

На дисплеї відображаються графіки температури, вологості повітря і показники з аналогових датчиків за останню добу та оптимізований висновок (рисунк 4).



SETTINGS – установки; SERVICE – сервісний режим; R – реле; DEBUG – налагодження; Channel 0 – Channel 6 – канали реле 0–6; Mode – режим, клік для переходу в налаштування режиму; Direction – напрям роботи; Type – тип каналу реле; Relay – реле; Valve – клапан; Day – добовий таймер; BACK – назад; Start – час початку роботи; Stop – час закінчення роботи; TEMP – покази температури

Рисунок 4 – Розшифровка написів на дисплеї

• Створювати штучне освітлення. Освітлення є основним і вирішальним фактором перебігу біологічних процесів у рослин, особливо в зимовий період часу. Якщо рослини будуть отримувати світло менше 10 годин на добу, уповільниться їх ріст, що є неприйнятним, особливо для вирощування розсади [15]. За рахунок штучного освітлення, яке імітує природні умови, забезпечується фотосинтез рослин, який приводить до прискорення обміну речовин у рослинах за умови, що система кондиціонування підтримує оптимальні значення температури й вологості повітря і ґрунту. При недостатній нормі освітленості рослини гинуть. Керування освітленням виконується з прив'язкою до часу доби. Тобто за допомогою відповідних налаштувань можна вибрати необхідну тривалість дня, провести вибір температури для денного і нічного режимів роботи.

• Створювати освітлення різного світлового спектра. Для підвищення ефективності росту рослин використовуються фітолампи. З попередніх досліджень було доведено, що для кращого проходження фотосинтезу рослини потребують світла з певним спектральним складом.

Контроль і керування мікрокліматом приміщення можна виконувати як за таймером, так і за мікрокліматичними показниками. Тобто режими всіх перелічених функцій можна налаштувати на таймер або на датчики, що контролюють мікрокліматичні параметри. Додаючи різні датчики (звуку, ІЧ випромінювання, рівня води й ін.), можна ускладнювати систему, яка може спрацьовувати від інших факторів.

Сервісне меню дає змогу виконувати керування кожним каналом вручну.

Велика перевага пристрою полягає в тому, що датчики не перебувають постійно під напругою, напруга подається тільки під час опитування, що дає можливість продовжити термін їх роботи (напруга подається за 50 мс до опитування і вимикається через 50 мс після опитування).

Робота сервоприводу виконується плавно, без ривків і незапланованих рухів при старті системи, тобто плавний розгін і гальмування з обмеженням максимальної швидкості за рахунок роботи сервоприводу з бібліотекою ServoSmooth.

Мікроконтролер пристрою Arduino Nano може житися через кабель Mini-B

USB від зовнішнього джерела живлення зі стабілізованою напругою 5 В (через вивід 27) або з нестабілізованою напругою 6–20 В (через вивід 30). Мікросхема FTDI FT232RL дає змогу ArduinoNano підключатися до персонального комп'ютера і за допомогою спеціальної програми зчитувати прості текстові дані. Використовуючи бібліотеку SoftwareSerial, створюється послідовний зв'язок з будь-яким виводом мікроконтролера, а бібліотека Wire дає можливість спростити роботу з шиною I2C, що реалізує підтримку послідовних інтерфейсів. В мікроконтролер можна завантажувати нові програми без використання зовнішнього програматора за оригінальним протоколом SNR500. Для того щоб перед завантаженням програми не натискати кнопку скидання, один із виходів мікросхеми FTDI FT232RL, що бере участь у керуванні потоком даних (DTR), з'єднаний з виходом RESET мікроконтролера через конденсатор номіналом 100 нф. Це приводить до того, що, коли з'явиться нуль на лінії DTR, то вихід RESET переходить на низький рівень на час, який достатній для перезавантаження мікроконтролера, оскільки процес прошивки синхронізований зі спадом сигналу на лінії DTR. Ця операція використовується для того, щоб прошивати мікроконтролер одним натисненням кнопки в середовищі програмування Arduino, що дає можливість зменшити час завантаження. Для налаштування і відстежування всіх процесів по часу використано мінімодуль часу DS3231 з резервним живленням.

Розроблений і виготовлений пристрій автоматичного керування мікрокліматом теплиці було змонтовано в лабораторії «Електротехнології» на макеті теплиці (рисунок 2, а), де проводилися відповідні дослідження з насінням томатів, що проходили передпосівну обробку високою напругою. В результаті цього насіння томатів обробляли високою напругою і висівали в двох ідентичних теплицях. Для проростання насіння в обох теплицях створювали відповідний мікроклімат різними методами, а саме:

- 1 теплиця – керування автоматичною системою на базі мікропроцесора;
- 2 теплиця – керування ПІД-регуляторами.

Протягом визначеного часу проводилися спостереження за розвитком рослин, що проростали в теплиці, в якій мікрокліматичні параметри контролювалися розробленою ав-

томатичною системою, і одночасно за рослинами, що проростали в теплиці, в якій параметри мікроклімату контролювалися ПД-регуляторами.

В результаті спостережень було проаналізовано особливості технологічних процесів двох теплиць з різними системами керування.

Протягом проведення досліджень розроблена система забезпечувала безперебійну роботу теплиці та з заданою точністю і чіткістю керувала технологічними процесами по забезпеченню оптимального мікроклімату, що приводило до швидшого проростання насіння і кращого розвитку рослин, адже суворе дотримання основних параметрів мікроклімату – це запорука високої врожайності і стійкості рослин до захворювання [12].

Характеристики роботи пристрою показали, що в нього є великий потенціал, а саме, те, що він виконує постійний контроль за всіма показниками одночасно за рахунок датчиків, які передають інформацію на керуючий пристрій, яка потім поступає на блок обробки, після чого видаються сигнали на відповідні виконавчі механізми. Крім того, пристрій має функціональні можливості, що дає змогу вибирати метод керування залежно від виду рослин і фази росту, тобто система може працювати за строго заданою програмою або за часом, який встановлюється залежно від дня в місяці, години в дні. Інтеграція всіх функцій в одній системі створює нові можливості керування, результатом чого є підвищення ефективності оптимізації якості регулювання мікроклімату за рахунок логічного керування, що надає пристрою додаткові переваги. Тобто

зменшується ризик виникнення помилок, на відміну від ручного керування декількома незалежними системами. Немаловажним є те, що розроблений пристрій замінює декілька окремих приладів:

- 2 регулятори температури повітря для імітації дня і ночі;
- регулятор вологості повітря;
- регулятор температури ґрунту;
- регулятор вологості ґрунту;
- реле часу;
- електромагнітний пускач освітлювальної установки;
- електромагнітний пускач вентиляційної установки та ін.

На відміну від розробленої автоматичної системи, установка на ПД-регуляторах має наступні недоліки:

- відсутня можливість відстежування і контролю за всіма параметрами одночасно;
- технологічні вимоги забезпечуються із суттєвими відхиленнями від заданих значень, що знижує швидкість проростання насіння та якість продукції;
- відсутня можливість плавного регулювання мікрокліматичних параметрів, що призводить до більшого використання електроенергії (рисунок 5);
- значні енергетичні та теплові втрати, що знижують собівартість продукції (рисунок 6);
- велика кількість електрообладнання, що призводить до зменшення ймовірності безвідмовної роботи і, відповідно, до меншої надійності при експлуатації;
- всі пристрої великогабаритні, що займають багато місця.

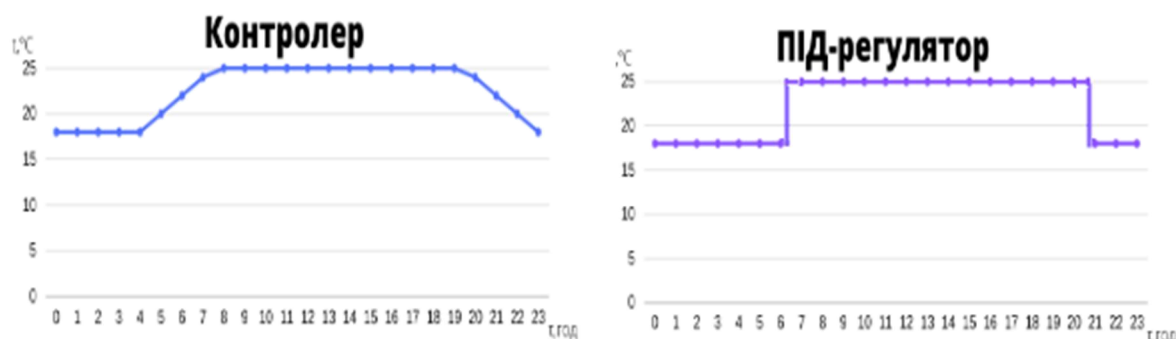


Рисунок 5 – Обігрів приміщення закритого ґрунту з імітацією дня і ночі

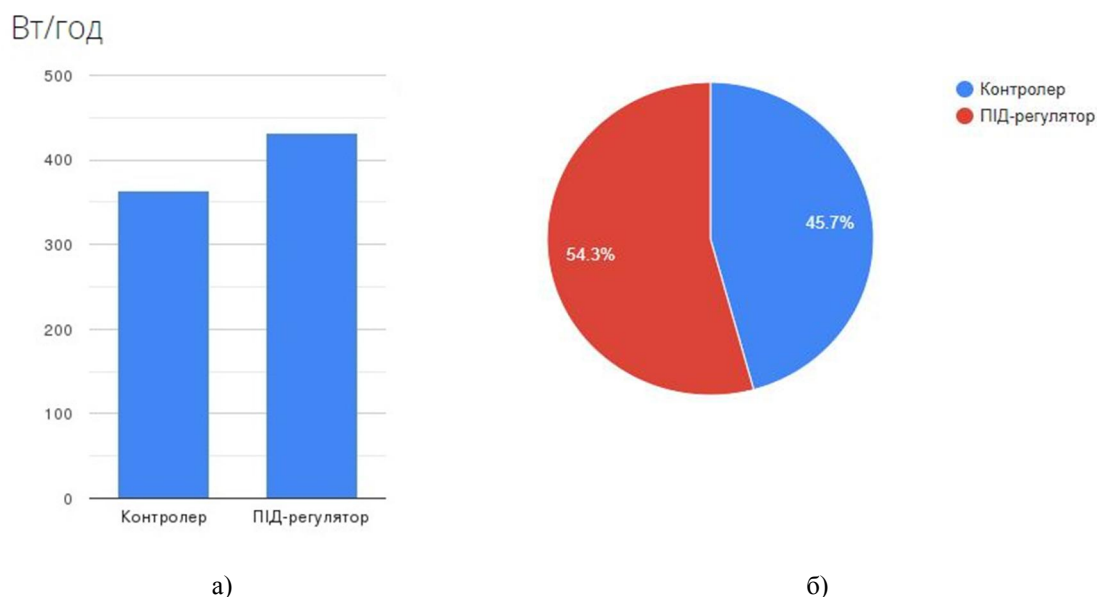


Рисунок 6 – Витрати електроенергії на освітлення при функціонуванні теплиці за добу

Розроблена автоматична система порівняно з системами, що пропонують відомі компанії «ОВЕН», «ICP DAS», «ЕКФ», науково-виробнича фірма «ФИТО» та ін., відповідно в 10 і більше разів дешевша. Враховуючи вартість усіх компонентів, додаткових пристроїв, блоків живлення та їх постачання, вартість розробленої і виготовленої установки становить 2530 грн. Це порівняно дуже дешево, що під силу найбільш малозабезпеченим тепличним господарствам.

Висновки і пропозиції. Розроблена і виготовлена система керування та її програмне забезпечення можуть бути використані для керування мікрокліматичними параметрами в теплицях для вирощування різних сільськогосподарських культур, оскільки є можливість регулювання вхідних параметрів у широких межах.

Система працює з досить високою точністю, що дає можливість підвищити ефективність роботи теплиці, а також знизити витрати на паливно-енергетичні ресурси.

Алгоритм роботи електрообладнання теплиці для підтримання мікрокліматичних параметрів дає змогу знизити споживання теплової енергії на 10 % за рахунок того, що всі параметри тісно пов'язані між собою, тому передбачено можливість одночасного їх контролювання та керування, налаштування обмеження зон параметрів мікроклімату та

створення імітації дня і ночі, причому показники температури і вологості відповідно наближаються до реального середовища.

Чіткість роботи електрообладнання за рахунок розробленої автоматичної системи не залежить від кліматичних умов та інших факторів, що дає можливість підвищити ефективність виконуваних технологічних процесів, в результаті яких покращується якість продукції та зменшується термін її вирощування, що забезпечує ефективне круглорічне функціонування високорентабельних тепличних господарств.

Виготовлену автоматичну систему можна використовувати не тільки для різного типу і призначення теплиць, але й в інкубаторах та для створення мікроклімату в приміщеннях іншого типу. Тобто ця система є багатофункціональною. Тому перед нами стоїть задача удосконалення системи і надання можливості відстежування параметрів мікроклімату та отримання повідомлень про їх значення за допомогою мобільного зв'язку.

Список використаних джерел

- [1] Д. А. Смірнов, та О. В. Матус, "Автоматизація процесу керування температурно-вологісним режимом у фермерській теплиці", *Вісник навчально-наукового інституту автоматики, кібернетики та*

- обчислювальної техніки НУВГП: зб. наук. пр., вип. 6, с. 85-93, Рівне: НУВГП, 2019.
- [2] С. М. Москвіна, та О. Ю. Гнатюк, "Метод управління тепловолісним режимом у промисловій теплиці", на *XIII Міжнар. конф. Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016)*, Вінниця: ВНТУ, 2016, с. 101-103.
- [3] О. В. Шульц, "Дослідження та розробка інформаційно-управляючої scada-системи процесом опалення у теплиці", на *70-й наук.-практ. конф. студентів "Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК"*, Київ: НУБіП України, 2016, с. 82.
- [4] В. П. Лисенко, І. М. Болбот, та І. І. Чернов, "Економічне обґрунтування впровадження роботехнічних систем у тепличні господарства", *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*, вип. 174 (2), с. 53-59, 2012.
- [5] Т. О. Прокопенко, "Інтелектуальна система керування температурно-вологісним режимом теплиці", *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*, вип. 209, ч. 1, с. 140-147, 2015.
- [6] Л. Г. Прищеп, *Эффективная электрификация защищенного грунта*. Москва: Колос, 1980.
- [7] О. Б. Бондарева, *Устройство теплиц и парников: Конструкции устройств обогрева, вентиляции и полива в индивидуальных теплицах*. Москва: АСТ, 2006.
- [8] А. Ладанюк, Н. Заєць, та Н. Власенко, *Сучасні технології конструювання систем автоматизації складних об'єктів*. Київ: Ліра-К, 2016.
- [9] Профессиональное тепличное оборудование. Москва. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fito-system.ru/>.
- [10] І. Г. Цмоць, та Т. В. Теслюк, "Структура та моделі роботи системи управління мікрокліматом мінітеплиці", *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології*, № 843, с. 228-237, 2016.
- [11] В. О. Сацик, та Д. П. Карпук, "Апаратне забезпечення автоматизованого регулювання мікроклімату теплиці", *Наукові нотатки: міжвуз. зб., вип. 40*, с. 245-250, Луцьк, 2013.
- [12] Л. Г. Віхрова, В. М. Каліч, та Т. О. Прокопенко, "Адаптивна автоматизована система збору та контролю основних параметрів мікроклімату в теплиці", *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр., вип. 29*, с. 168-172, Кіровоград: КНТУ, 2016.
- [13] Н. Ю. Кривицька, В. Є. Командровська, та В. В. Андрущенко, "Інтеграційні процеси підприємств України: визначення, види та напрями", *Економіка та управління підприємствами*, вип. 24, с. 131-134, 2017.
- [14] В. Т. Діордієв, А. О. Кашкарьов, та О. О. Діордієв, "Автоматизована система моніторингу та керування мікрокліматом у теплиці", *Науковий вісник ТДАТУ: матеріали наук.-техн. конф. студентів та магістрантів*, вип. 8, т. 2, Мелітополь, 2018.
- [15] О. М. Євсєєнко, "Розробка апаратно-програмної системи керування мікрокліматом теплиці", *Технічна інженерія*, № 1 (85), с. 104-109, 2020.

References

- [1] D. A. Smirnov, and O. V. Matus, "Automation of the process of temperature and humidity conditions control in the greenhouse", *Visnyk navchalno-naukovoho instytutu avtomatyky, kibernetiky ta obchyslivvalnoi tekhniky NUVHP: coll. of sci. works*, iss. 6, pp. 85-93, Rivne: NUWEE, 2019 [in Ukrainian].
- [2] S. M. Moskvina, and O. Yu. Hnatiuk, "Method of heat and moisture regime control in an industrial greenhouse", in *XIII Int. Conf. Measurement and control in complex systems (MCCS - 2016)*, Vinnytsia: VNTU, 2016, pp. 101-103 [in Ukrainian].
- [3] O. V. Schultz, "Research and development of information control scada-system for the heating process in a greenhouse", in *70th Sci.-Pract. Students' Conf. Energy Supply, Electrical Technologies, Electrical Engineering and Intelligent Control Systems in Agriculture*, Kyiv: NUBiP Ukrainy, 2016, p. 82 [in Ukrainian].
- [4] V. P. Lysenko, I. M. Bolbot, and I. I. Chernov, "Economic substantiation of introduction of robotic systems in greenhouses",

- Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriya: Tekhnika ta enerhetyka APK*, iss. 174 (2), pp. 53-59, 2012 [in Ukrainian].
- [5] T. O. Prokopenko, "Intelligent system for temperature and humidity control of a greenhouse", *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriya: Tekhnika ta enerhetyka APK*, iss. 209, part 1, pp. 140-147, 2015 [in Ukrainian].
- [6] L. G. Prischep, *Effective electrification of protected soil*. Moscow: Kolos, 1980 [in Russian].
- [7] O. B. Bondareva, *The device of greenhouses and hotbeds: Designs of devices of heating, ventilation and watering in individual greenhouses*. Moscow: AST, 2006 [in Russian].
- [8] A. Ladanyuk, N. Zayets, and N. Vlasenko, *Modern technologies for designing automation systems for complex objects*. Kyiv: Lira-K, 2016 [in Ukrainian].
- [9] Professional greenhouse equipment. Moscow. [Online]. Available: <http://www.fito-system.ru/>. [in Russian].
- [10] I. G. Tsmots, and T. V. Teslyuk, "Structure and models of operation of the mini-greenhouse microclimate control system", *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika"*. *Kompiuterni nauky ta informatsiini tekhnologii*, no. 843, pp. 228-237, 2016 [in Ukrainian].
- [11] V. O. Satsik, and D. P. Karpuk, "Hardware for automated regulation of greenhouse microclimate", *Naukovi notatky: interuniversity coll.*, iss. 40, pp. 245-250, Lutsk, 2013 [in Ukrainian].
- [12] L. G. Vikhrova, V. M. Kalich, and T. O. Prokopenko, "Adaptive automated system for collection and control of basic parameters of microclimate in a hothouse", *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia: coll. of sci. works*, iss. 29, pp. 168-172, Kirovohrad, 2016 [in Ukrainian].
- [13] N. Yu. Kryvytska, V. Ye. Komandrovskaya, and V. V. Andrushchenko, "Integrated processes of enterprises of Ukraine: definitions, types and directions", *Ekonomika ta upravlinnia pidpriemstvamy*, iss. 24, 2017 [in Ukrainian].
- [14] V. T. Diordiev, A. O. Kashkarov, and O. O. Diordiev, "Automated monitoring and control system for greenhouse microclimate", *Naukovyi visnyk TDATU: Proc. of the sci. and tech. conf. of students and undergraduates*, iss. 8, vol. 2, Melitopol, 2018 [in Ukrainian].
- [15] O. M. Evseenko, "Development of hardware and software system for greenhouse microclimate control", *Tekhnichna inzheneriia*, no. 1 (85), pp. 104-109, 2020 [in Ukrainian].

S. V. Gaydukevich, senior lecturer,
e-mail: SoleykoS@i.ua

N. P. Semenova, senior lecturer,
e-mail: 0677524248@ukr.net

Ya. A. Leskiv, student, master
e-mail: yaroslav.leskiv@gmail.com

Separated subdivision of the National University of Bioresources and Natural Use of Ukraine
"Berezhansky agrotechnical institute",
Akademichna st., 20, Ternopil region, Berezhany, 47501, Ukraine

AUTOMATED ELECTRICAL EQUIPMENT CONTROL SYSTEM IN INDOOR GROUND STRUCTURES

Today, greenhouses with outdated technology suffer great losses. To increase the efficiency of greenhouses, it is necessary to rapidly automate the electrical equipment of technological processes to maintain microclimatic parameters in order to create favorable conditions for germination and plant life.

Modern automated systems offered by the market are expensive, so for small greenhouses they have a very long payback period and low profitability.

Due to the economic crisis and the inability of many greenhouses to re-equip production processes using state-of-the-art automatic control systems based on an integrated approach, which includes modern electrical equipment, software, the development of intelligent, multifunctional automatic microclimate control system based on ATmega328 microcontroller, that allows to increase the efficiency of the greenhouse by monitoring microclimatic parameters and data processing and to control and timely eliminate deviations of parameters caused by various disturbances from the set values in order to create favorable conditions for plant germination and viability is proposed.

The basic electric scheme of control of a greenhouse microclimate system the principle of work of which is based on automatic control by means of the programming block is developed. The selection of sensors for monitoring the parameters of the microclimate and intermediate relays for the operation of actuators is made.

As a result of research it is established that the proposed development allows to increase the reliability of electrical equipment during operation, improve existing mechanisms as a result of achieving the desired algorithm, that is, to bring processes closer to optimal balance and save heat consumption by 10%, thereby reducing energy consumption and increasing productivity.

The proposed system can be used not only to control the microclimate parameters of different types of greenhouses, but also to control the microclimate of incubators and various production apartments.

Keywords: *automatic control system, microclimate, greenhouse, microprocessor, functioning.*

[0000-0001-5171-6330] **А. П. Стахова**, к.т.н., доцент,
e-mail: sap@nau.edu.ua

[0000-0002-6525-9721] **В. П. Квасніков**, д.т.н., професор
Національний авіаційний університет
просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ МАШИННОГО ОБЛАДНАННЯ ЗАСОБАМИ ВІБРОДІАГНОСТИКИ

В роботі визначено, що актуальною задачею є своєчасне виявлення небезпечного стану механізму. Показано, що вимірювання рівня вібрації машинного обладнання при різних режимах його роботи дає можливість прогнозувати працездатність пристрою протягом терміну експлуатації. В роботі визначено можливі несправності машинного обладнання, в ролі якого виступає навчальний стенд, і складено вібродіагностичну карту, за якою визначаються несправності. Вирішення цієї задачі дає змогу виявляти дефекти обладнання на ранній стадії їх появи з заданою точністю та водночас зменшити витрати на виявлення дефектів, що, в свою чергу, вимагає детального вивчення типових дефектів вібраційного стенду, які визначаються вібродіагностикою.

Ключові слова: коливання, вібрації, параметри вібрацій, вібраційний стенд, експлуатаційні дефекти.

Вступ. На сучасному етапі розвитку авіації основним напрямом забезпечення працездатного стану авіаційної техніки є підвищення ефективності її контролю. З цієї метою проводиться робота з вивчення технічного стану спецтехніки та подальшого аналізу його змін.

Більшість несправностей машинного обладнання виражається в підвищенні вібрацій, отже, аналіз вібрації є потужним засобом для діагностики обладнання. Водночас кожна несправність або пошкодження має свій вид вібрацій. Перевищення допустимого рівня вібрацій при роботі різних видів техніки призводить до зниження надійності та довговічності окремих елементів у цих пристроях. Поява сучасної вібровимірювальної апаратури забезпечує можливість проведення точних вимірювань, реєстрації та подальшого аналізу динамічних процесів, тобто вібраційних сигналів.

Забезпечувати працездатний стан машинного обладнання неможливо без впровадження сучасних діагностичних методів та розробки нових методик, застосування яких значно підвищить ефективність контролю. Отже, вдосконалення методів і систем безперервного моніторингу технічного стану в робочих умовах стає актуальним. Однак при своїх перевагах системи безперервного моніторингу мають великий недолік – високу ціну.

Дешевше контролювати параметри вібрацій спеціальним приладом – віброаналізатором – у проміжку часу, що дасть змогу виявляти дефекти обладнання на ранній стадії їх розвитку, але водночас зменшити витрати на їх виявлення.

Метою дослідження є необхідність виявлення дефектів машинного обладнання на ранній стадії їх розвитку з заданою точністю та зменшення витрат на їх виявлення. Це, в свою чергу, вимагає детального вивчення типових дефектів вібраційного стенду, які визначаються вібродіагностикою, тобто уточнення діагностичних ознак дефектів.

Аналіз останніх джерел. Вібрації є коливаннями механічної або структурної системи щодо положення рівноваги. Основоположниками теорії коливань є: С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уївер. У виданні [1] описано основи теорії коливань, наведено велику кількість прикладів, взятих зі спостереження над коливаннями машин і різних конструкцій, показано її застосування при вирішенні практичних завдань.

Вібраційним процесам і механічним коливанням у техніці присвячено велику кількість науково-технічної літератури, а саме: «Динаміка і міцність машин. Теорія механізмів і машин» у двох книгах [2]; довідник світової популярності «Harris * Shock and Vibration Handbook» [3] та ін.

Питанням вібродіагностики присвячено багато робіт [4–6] де розглядається широке коло питань, наприклад, у [6] наводяться теоретичні основи вібродіагностики. Розглянуто різні види вібродіагностичного і шумовимірювального обладнання. Викладено сучасні методи вимірювання вібрації та наведено їх класифікацію. Проаналізовано поточний стан ринку вітчизняних вібровимірювальних приладів. Викладено основні методи вібродіагностики, оцінки технічного стану машин, наведено приклади несправностей машин і устаткування, та методи їх виявлення.

Аналіз робіт у сфері вібродіагностики показав, що переважну більшість робіт присвячено аналізу процесу генерації вібраційних сигналів дефектами машин [7–9], формуванню еталонного спектра і методам порівняння еталонного і поточного спектрів [10–13]. У той же час для підвищення якості вібраційної діагностики, особливо при діагностиці дефектів, що зароджуються, необхідно підвищити точність оцінювання спектрів сигналів, тобто розглянути питання метрологічного забезпечення і підвищення точності вимірювань при вібродіагностиці. Це дасть змогу оптимізувати параметри апаратури і точніше задавати нижній поріг еталонного спектра, що дасть можливість виявляти дефекти, які зароджуються на більш ранній стадії.

Виклад основного матеріалу полягає у детальному вивченні типових дефектів вібраційного стенду, які визначаються вібродіагностикою.

Для ідентифікації станів механізмів з вузлами, що обертаються, навіть найпростішою системою вібраційного моніторингу необхідно контролювати їх вібрацію в усіх частотних діапазонах: низькочастотному, середньочастотному, високочастотному й ультразвуковому. Кількість контрольованих параметрів діагностичних сигналів об'єкта в системі моніторингу з можливістю ідентифікації стану повинна бути достатньо великою – від 30 до 50, що дає можливість виявляти дефекти за значною частиною їх діагностичних ознак, кожна з яких може мати різну ефективність на різних стадіях розвитку дефектів. Бажано в кожній частотній області контролювати вібрацію в декількох смугах частот, які перекриваються, тобто вимірювати широкосмуговий спектр вібрації.

У кожній частотній смузі системою моніторингу повинна контролюватися потуж-

ність вібрації, але для єдності одиниць виміру періодичної, випадкової та імпульсної вібрації вимірюється, як правило, квадратний корінь з її потужності, тобто рівень вібрації.

Вимірювання рівня (або потужності) низькочастотної вібрації механізму з поділом її на групу компонент різної частоти дає змогу, по-перше, виявляти велику групу найбільш ймовірних дефектів, а по-друге, в більшості випадків визначити найбільш ймовірний вид розвиненого дефекту. Додатковий вимір середньочастотної вібрації з поділом її на групу компонент різної частоти дає змогу, по-перше, виявити дефекти зносу на більш ранній стадії розвитку, а по-друге, при виявленні розвиненого дефекту по низькочастотній вібрації точніше визначити дефектний вузол механізму. Незалежне вимірювання високочастотної та ультразвукової вібрації, яка швидко затухає при поширенні по механізму, часто дає можливість локалізувати місце (вузол) виникнення дефекту до того, як його розвиток стане незворотним. Цьому ж сприяє контроль температури підшипникових вузлів механізму і, зокрема, безконтактний контроль температури обертових вузлів механічних передач, наприклад з'єднувальних муфт.

Дефект, який виникає або розвивається в процесі експлуатації механізму, може призводити або до зміни властивостей коливальних сил в одному вузлі механізму, або до зменшення жорсткості елементів механізму чи вузлів його кріплення до фундаменту, або до зміни жорсткості чи приєднаної маси фундаментних конструкцій.

Найбільші успіхи у визначенні виду і величини дефекту досягаються в тому разі, коли дефект змінює величину або форму коливальної сили в певному вузлі механізму, оскільки ця сила створює доступну для вимірювання простою системою моніторингу вібрацію на певній частоті та її гармоніках. Набагато складніше визначаються вид і місце виникнення дефекту, що впливає на жорсткість коливальної системи, оскільки при цьому можуть зростати найнесподіваніші компоненти вібрації механізму. У зв'язку з цим досить часто причина зареєстрованої зміни вібраційного стану механізму простою системою моніторингу не може бути однозначно визначена, і виявлений дефект визначається як не ідентифікований. Питання локалізації такого дефекту і уточнення його виду є предметом віброналагодження механізму.

Крім вимірювання рівня (потужності) різних за частотою компонент вібрації механізмів, у професійній діагностиці аналізуються зміни потужності цих компонент у часі, які можуть мати різні форми – скачки, монотонні зміни, а також періодичні, випадкові або імпульсні флуктуації.

Методи аналізу повільних, середньо-швидкісних і швидких змін потужності виділених компонент вібрації істотно розрізняються, ускладнюючи використовувати засоби вимірювання і аналізу. У найпростіших системах моніторингу доводиться обмежуватися тільки трьома основними видами аналізу таких змін – виявленням стрибків окремих параметрів вібрації або температури, побудовою трендів їх повільної монотонної зміни в часі і реєстрацією імпульсних флуктуацій ударного походження в сигналі високочастотної та ультразвукової вібрації. Виявлення стрибків вібрації і температури зазвичай дає змогу виявити небезпечні порушення в режимах роботи механізмів, побудова трендів – оцінити небезпеку наслідків цих порушень (за швидкістю і точністю повернення до вихідного стану) або прогнозувати розвиток наявних дефектів, а виявлення ударних імпульсів – контролювати стан мастила і своєчасно виявляти дефекти зносу підшипників.

Різноманіття методів ідентифікації різних дефектів на різних стадіях їх розвитку, а також порушень допустимих умов експлуатації механізму призводить до необхідності формування своїх правил і алгоритмів ідентифікації причин зареєстрованих змін стану для кожного виду механізму. Водночас правила ідентифікації дефектів окремих вузлів, наприклад підшипників кочення, можуть бути загальними, але при цьому враховувати специфіку функціонування інших вузлів механізму. Чим більше різних діагностичних ознак використовується для ідентифікації причин зміни стану механізму, тим точніше вирішується завдання ідентифікації і тим менша ймовірність прийняття помилкових рішень щодо виведення механізму в ремонт або прогнозованої тривалості його безвідмовної роботи. У той же час для збільшення кількості контрольованих ознак дефектів необхідно ускладнювати засоби вимірювання і аналізу вторинних процесів.

Опис дефектів невірноваженості ротора. Дисбаланс, що обумовлений відхиленням робочих геометричних розмірів ротора від

номінальних розмірів, стає основною причиною невірноваженості ротора механічного походження. При обертанні з деякою кутовою швидкістю в такому невірноваженому роторі виникають відхилення його розмірів від номінальних, що супроводжується виникненням відцентрової сили. Така сила, обертаючись разом із ротором, викликає змінні навантаження на опори.

Для ідентифікації дефектів роторів в опорах обертання по вібрації простою системою моніторингу використовується тільки низькочастотна вібрація опор обертання. Особливу увагу ідентифікації дефектів роторів потрібно приділяти в разі, коли максимальне перевищення вібрацією механізму встановлених порогів стану має місце в зоні частот, що охоплює кілька (зазвичай до п'яти) гармонік частоти обертання. Переважні зміни вібрації опор обертання на середніх і високих частотах зазвичай є ознакою дефектів інших вузлів механізму.

Вияток можуть становити дефекти з'єднувальних муфт (карданів), які в ряді випадків призводять до сильних ударних навантажень на підшипники й істотного зростання їх високочастотної вібрації. Однак при появі таких ударів через дефекти з'єднувальних муфт зростає високочастотна вібрація відразу в кількох опорах обертання механізму.

Основною ознакою невірноваженості ротора (лінії вала), в тому числі однією з її основних причин – неспіввісності ротора з поверхнями тертя на його валу, є прискорене зростання вібрації на частоті його обертання, водночас відсутнє помітне зростання вібрації на другій і наступних гармоніках частоти обертання. Це зростання може бути поступовим (у міру зносу поверхонь, що труться, опор обертання на валу, забруднення або корозії поверхні ротора), що змінюється в міру прогріву механізму після пуску (неоднорідне теплове розширення ротора), або раптовим (зміщення частин ротора під дією відцентрової сили або невелике відносне зміщення напівмуфт під навантаженням). Для ідентифікації неспіввісності ротора і вала можуть бути залучені ознаки дефектів робочих вузлів, посаджених на ротор, зокрема ознаки їх бою.

Невірноваженість ротора характеризується як стан механізму, при якому головний вектор або головний момент сил інерції не дорівнюють нулю. Розрізняють такі види невірноваженостей:

- статична невірноваженість (тобто вісь обертання ротора не збігається з головною центральною віссю інерції ротора і паралельна їй);

- моментна невірноваженість (тобто вісь обертання ротора перетинається з головною центральною віссю інерції в центрі мас ротора);

- динамічна невірноваженість (тобто вісь обертання ротора перетинається з його головною центральною віссю інерції не в центрі мас. Динамічна невірноваженість складається зі статичної та моментної невірноваженостей).

Криві (форми сигналу) вібропереміщення і віброшвидкості при невірноваженості ротора і за відсутності інших розвинених дефектів агрегата в багатьох випадках періодичні або майже періодичні, з періодом коливань, що відповідає частоті обертання ротора, та мають форму сигналу, наближену до синусоїдальної. Амплітуда і фаза вібрації практично стабільні в часі на частоті обертання ротора. Форма сигналу віброприскорення часто має більш «складний» («випадковий») характер, особливо якщо ротор спирається на підшипники кочення.

В амплітудному спектрі вібрації складова на частоті обертання ротора є переважаючою і, в більшості випадків, її величина, за відсутності інших складових, крім дисбалансу дефектів, значно (в два і більше разів) перевищує величину вібрації на її вищих гармоніках, а рівень шумових компонент спектра на 40..50 дБ [15].

Опис дефектів ремінної передачі. З основних дефектів ремінної передачі, які доступні для виявлення найпростішою системою моніторингу стану по вібрації і температурі підшипникових вузлів, крім дефектів власне підшипників, можна виділити наступні дефекти:

- дефекти ведучого або веденого вала і насадженого на вал шківів,

- непаралельність валів або зміщення шківів один щодо одного,

- дефекти ремня,

- дефект натягу ремня.

Для виявлення зазначених дефектів ремінної передачі необхідно вимірювати вібрацію підшипникових вузлів кожного вала (в радіальному до осі обертання вала напрямку), а також їх температуру і, по можливості, температуру обертючих шківів. При роботі передачі в декількох режимах навантаження з одно-

часною зміною частоти обертання приводу також варто вибирати два-три типові режими, вимірюючи вібрації на кожному і вносячи в базу даних частоту обертання ведучого або веденого вала.

При розглянутих дефектах ремінної передачі вібрація може зростати в частотних смугах трьохоктавного спектра, що відповідають:

- частоті обертання одного з валів (дефекти вала або посадки шківів),

- другій гармоніці частоти обертання валів (непаралельність валів або зміщення шківів),

- частоті обертання ремня та її гармонікам (дефекти ремня),

- високим частотам (надмірне натягнення ремня з перевантаженням підшипників).

Надмірне натягнення ремня може призвести до зростання середньоквадратичного значення ультразвукової вібрації і зростання температури більшості підшипників, недостатнє натягнення може призвести до зростання температури шківів.

Особливістю ремінної передачі, що часто трапляється, є близькість частоти обертання ремня і сепаратора підшипників найбільш високообертового вала передачі.

Оскільки ознаки дефектів ремня і підшипників кочення, що використовуються, практично збігаються, зростання вібрації в трьохоктавних смугах частот, кратних 0,4 від частоти обертання ведучого вала, може не бути достатньою ознакою дефекту ремня. Необхідно проводити незалежний аналіз ознак дефектів підшипників, особливо в області високо-частотної вібрації, для декількох точок контролю вібрації передачі й ідентифікувати дефект ремня, якщо ознаки наявні в декількох (не менше двох) точках контролю.

Опис дефектів підшипників кочення. Завданнями оцінювання стану підшипників, які значною мірою визначають ресурс механізму, є пошук дефектного підшипника з-поміж встановлених у механізм, ідентифікація величини дефекту і швидкості його розвитку. У найпростішому випадку дефектний підшипниковий вузол (з усіх підшипникових вузлів механізму) виділяється за максимальним зростанням рівня вібрації на високих і ультразвукових частотах.

Після виділення дефектного вузла оцінюється величина дефекту підшипника по зростанню температури і / або рівня середньочас-

тотної вібрації вузла в широкій смузі частот за умови, що це зростання в дефектному вузлі істотно вище, ніж в інших. Це основний критерій поділу дефектів підшипників та інших вузлів механізму. Заключний етап – оцінювання швидкості розвитку дефекту по трендах зміни обраних параметрів середньочастотної і високочастотної вібрації (температури) в часі і прогноз їх досягнення порогів «небезпеки».

Типові дефекти підшипників кочення, доступні для ідентифікації з метою діагностики та довгострокового прогнозу стану підшипника, можна розділити на п'ять різних груп:

- перевантаження поверхонь кочення,
- знос (рівномірний) поверхонь кочення,
- дефекти поверхонь кочення (нерівномірний знос, відколи, раковини, тріщини зовнішнього і внутрішнього кілець, тіл кочення),
- дефекти поверхонь ковзання (знос, тріщини сепаратора і захисних шайб)?
- дефекти мастила.

Досвід експлуатації обладнання показує, що, якщо на агрегат монтується бездефектний підшипник, то основні причини його виходу з ладу розподіляються приблизно таким чином: 40 % – порушення мастила, 30 % – порушення збірки й установки, 20 % – неправильне застосування, підвищена вібрація тощо і тільки 10 % – природний знос.

Складові (компоненти) вібрації різної частоти:

- низькочастотна вібрація, що небезпечна для людини і знижує ресурс механізмів (типовий частотний діапазон – до 300–500 Гц), нормується середньоквадратичне значення вібропереміщення або віброшвидкості до частоти 1000 Гц (передається від джерела коливальних сил до будь-якого вузла механізму);
- середньочастотна вібрація (типовий частотний діапазон – від 300–500 Гц до 3–5 кГц), поширюється від джерела коливальних сил до точок її контролю зі зростаючими з частотою втратами і є джерелом небезпечного для людини повітряного шуму механізму (шум механізму нормується до 10 кГц);
- високочастотна вібрація, що має типовий частотний діапазон від 3–5 кГц до 15–20 кГц, швидко загасає на контактних поверхнях між вузлами механізму, зазвичай містить детальну інформацію про сили тертя в контрольованому вузлі або пульсації тиску в потоці рідини (газу), що передаються на корпус механізму;

- ультразвукова вібрація (понад 15–20 кГц), порушується при механічному контакті поверхонь тертя з розривом масляного шару та характеризує якість його функціонування, при поширенні значна частина ультразвукової вібрації відбивається від контактних поверхонь між вузлами механізму.

Ідентифікація дефектів підшипника кочення може проводитися за низькочастотною та середньочастотною вібрацією підшипникового вузла (за зростанням відповідних рядів підшипникових складових в її спектрі), за високочастотною вібрацією вузла (за частотами періодичної модуляції збуджуваних вібрацій сил тертя в підшипнику) та ультразвуковою вібрацією (за періодичністю ударних імпульсів, що виникають при розривах масляної плівки).

Першим завданням ідентифікації дефектів підшипника за вимірюваннями простою системою моніторингу є порівняння трьохоктавних спектрів вібрації і параметрів високочастотної і / або ультразвукової вібрації (середньоквадратичного значення і піка) з порогоми.

Якщо перевищені пороги середньоквадратичного значення або піка ультразвукової вібрації тільки в одному підшипниковому вузлі, найбільш імовірний дефект підшипника – саме в цьому вузлі, а якщо поріг перевищила температура вузла, дефект становить реальну небезпеку.

Якщо додатково до зростання ультразвукової вібрації має місце її зростання хоча б в одній із трьох октав на середніх частотах (зазвичай починаючи з 1–2 кГц) і немає значного зростання вібрації в цій же трьохоктаві в інших вузлах механізму, дефект підшипника небезпечний навіть при відсутності зростання температури дефектного вузла.

Зазначені ознаки дефектів підшипників відносяться і до дефектів поверхонь кочення, і до поверхонь ковзання, і до дефектів мастила. Не мають великого впливу на високочастотну вібрацію лише дефекти у вигляді перевантаження поверхонь кочення і рівномірного зношування підшипників.

Дефект мастила є не тільки причиною багатьох дефектів підшипника, а й наслідком практично будь-якого розвиненого дефекту, оскільки на певній стадії розвитку всі дефекти стають джерелом продуктів зносу, що призводять до погіршення складу мастила. Тому контроль стану підшипника має починатися з контролю стану мастила.

Основною вібраційною ознакою дефектів мастила (в тому числі й дефектів поверхонь тертя) в підшипниках кочення є зростання високочастотної й ультразвукової вібрації підшипникових вузлів, при якому контрольовані параметри перевищують встановлені порогові значення. На початкових стадіях розвитку дефекту мастила зростає, перш за все, пік ультразвукової вібрації. Однак факт перевищення порога ультразвукової (або високочастотної) вібрації ще не дає однозначної інформації про вид і величину дефекту. Проте в разі істотного зростання середньочастотної вібрації переважно в дефектному підшипнику можна ідентифікувати дефект мастила як вторинний, що є наслідком дефектів навантажених поверхонь тертя кочення. На жаль, дефекти сепаратора і захисних шайб підшипника кочення найчастіше виявляються простою системою моніторингу тільки опосередковано, за погіршення властивостей мастила. Лише в рідкісних випадках підвищений знос сепаратора вдається виявити за ознаками автоколивань ротора в підшипниках кочення.

У деяких випадках, наприклад при швидкому розвитку дефекту поверхні кочення (тріщина), а також при дефектах монтажу підшипника або при контролі стану підшипника після додавання мастила, стан змащення виявляється задовільним, навіть якщо є інший сильний дефект підшипника, небезпечний для продовження експлуатації механізму. У таких випадках рішення про необхідність проведення ремонту приймається за зростанням середньочастотної вібрації контрольованого підшипникового вузла в декількох смугах частот при відсутності аналогічного зростання вібрації в інших підшипникових вузлах механізму.

Зростання температури одного підшипникового вузла без супутнього зростання його ультразвукової вібрації найчастіше є наслідком надлишку мастила в підшипнику. Крім того, через наявність природних і незначних нерівностей поверхонь кочення підшипника продавлювання мастила, як правило, призводить до зростання середньочастотної вібрації підшипникового вузла, і цю ознаку перевантаження також необхідно брати до уваги.

Опис дефектів підшипників ковзання.

Типові дефекти підшипників ковзання, доступні для ідентифікації з метою глибокої діагностики та довгострокового прогнозу стану підшипника, можна розділити на чотири різні групи:

- перевантаження поверхонь тертя;
- небезпечні зміни зазору в підшипнику;
- дефекти поверхонь тертя (нерівномірний знос, відколи, тріщини поверхонь тертя (вкладишів));
- дефекти мастильного шару.

Ідентифікація дефектів підшипника може проводитися за низькочастотною вібрацією механізму (щодо особливостей коливань ротора в підшипниках ковзання), за середньочастотною вібрацією підшипникового вузла (за зростанням гармонік частоти обертання високої кратності) і за високочастотною вібрацією підшипникового вузла, що порушує пульсацію тиску в змащувальному шарі.

З діагностичної точки зору, підшипники ковзання можна розділити на три основні групи:

- підшипники з нерозривним шаром мастила (подача мастила під тиском);
- підшипники з масляною ванною (формування масляного клина при пуску);
- підшипники з «жорстким» мастилом.

Першим завданням ідентифікації дефектів підшипника ковзання за вимірами простою системою моніторингу є порівняння трьохоктавних спектрів вібрації і параметрів високочастотної (ультразвукової) вібрації (середньоквадратичного значення і піка) з порогоми. Якщо перевищені пороги СКЗ або піка ультразвукової вібрації тільки в одному підшипниковому вузлі, найбільш імовірний дефект поверхонь тертя – саме в цьому вузлі, а якщо поріг перевищила температура вузла, дефект становить реальну небезпеку.

Якщо додатково до зростання середньоквадратичного значення і піка має місце зростання вібрації в декількох трьохоктавах на середніх частотах (зазвичай починаючи з 1–2 кГц), немає значного зростання вібрації в цих же трьохоктавах у інших вузлів механізму, дефект підшипника небезпечний навіть при відсутності зростання температури дефектного вузла.

Виявляти небезпечне зростання зазору в підшипнику горизонтально розташованого механізму через рівномірний знос вкладишів можна за появи автоколивань ротора.

Статичне перевантаження підшипників, наприклад через неспіввісності опор обертання з'єднаних муфтою роторів, можна виявляти за зростанням температури підшипникових вузлів.

Опис дефектів електромагнітної системи електромоторів. У багатьох випадках електричні машини, що використовуються як приводний двигун агрегатів з регульованою частотою обертання, живляться не безпосередньо від загальної електричної мережі, а через регульовані статичні випрямлячі і перетворювачі, які спотворюють форму вихідної напруги і значно впливають на вібрацію агрегата.

Контроль стану електродвигуна, та й усього агрегата в цьому випадку вимагає знання частоти живильної напруги і частоти обертання агрегата на момент вимірювання вібрації, а також урахування впливу форми напруги живлення на вібрацію електродвигуна і агрегата в цілому.

Для ідентифікації причин зміни стану електричної машини за допомогою простої системи моніторингу необхідне знання типу машини, частоти обертання ротора, частоти напруги живлення (для машин змінного струму) та кількості зубців (полюсів) на роторі (якорі). Для машини постійного струму потрібна додаткова інформація – кількість основних полюсів і пластин колектора, яка зазвичай кратна кількості зубців якоря.

В асинхронних електродвигунах найбільші зміни вібрації при дефектах електромагнітної системи можуть відбуватися на частоті обертання ротора, на парних гармоніках напруги живлення, а також на зубцевих частотах. Всі інші зміни вібрації електромагнітного походження в асинхронних електродвигунах ідентифікувати за трьохоктавним спектром вібрації вкрай складно.

Окрім як через дефекти, вібрація електромагнітного походження в двигунах змінного струму може істотно змінюватися через зміну властивостей живильної трифазної напруги (несиметрії її величини по фазах або спотворення форми), а також через перевантаження двигуна. При несиметрії напруги зростає вібрація на другій гармоніці її частоти, при спотвореннях – на шостій, дванадцятій, а іноді й на більш високих (кратних шостій) гармоніках.

При перевантаженні двигуна з подальшим частковим магнітним насиченням активного сердечника ротора і статора також зростає вібрація на шостій і кратних гармоніках частоти напруги живлення. При виявленні зростання зазначених складових вібрації асинхронного електродвигуна (і синхронного також) є простий спосіб розділити можливі причини на дві основні групи, пов'язані зі змінами стану влас-

не електродвигуна і живильної його електричної мережі шляхом контролю і порівняння вібрації декількох агрегатів, які живляться від однієї мережі. При проблемах з мережею схожі зміни вібрації спостерігаються в усіх електродвигунах змінного струму.

До основних дефектів електромагнітної системи, що впливають на вібрацію синхронної електричної машини (при живленні симетричною синусоїдальною напругою в режимі двигуна або при відсутності несиметрії і нелінійності навантаження в режимі генератора), відносяться:

- дефекти статора (обриви, короткі замикання в його обмотках і в активному осерді),
- дефекти ротора (обриви і замикання в обмотці постійного струму, дефекти кріплення полюсів),
- зміни форми зазору між полюсами і статором (статичний і обертальний ексцентриситети),
- розпушення активних пакетів сердечника статора великих електричних машин.

Зазори в синхронних машинах за величиною багаторазово перевищують зазори в асинхронних двигунах, їх ексцентриситети у відносних одиницях зазвичай невеликі і на стан машини практично не впливають.

Винятком є статичний ексцентриситет у великих машинах, в яких статор і ротор кріпляться до фундаменту незалежно один від одного.

У синхронних електричних машинах найбільші зміни вібрації при дефектах електромагнітної системи можуть відбуватися на частоті обертання ротора, на парних гармоніках напруги живлення і на зубцевих частотах (кратних добутку частоти обертання на $3/2$ від кількості зубців ротора в неявнополюсних машинах або частоти обертання на кількість зубців статора в явнополюсних машинах). Всі інші зміни параметрів електромагнітної системи ідентифікувати за трьохоктавним спектром вібрації вкрай складно.

За виявленими змінами зазначених компонентів вібрації синхронних електричних машин можуть бути ідентифіковані наступні групи дефектів:

- статичний ексцентриситет зазору, дефекти статора, несиметрія напруги живлення, розпушення пакетів статора – за зростанням вібрації на подвійний частоті напруги живлення;

- короткі замикання в обмотках збудження і дефекти кріплення полюсів ротора (обертається ексцентриситет зазору) – за одночасним зростанням вібрації на частоті обертання і на зубцевих частотах;

- часткове магнітне насичення активно-го сердечника машини і нелінійні спотворення напруги – за зростанням вібрації на шостій гармоніці напруги живлення.

Для більш докладної ідентифікації деяких дефектів синхронної електричної машини можна скористатися наступними додатковими ознаками:

- зростанням низькочастотної вібрації статора електричної машини (особливо в агрегатах, пружно закріплених на фундаментах) переважно в тангенціальному напрямку при дефектах статора, при проблемах з напругою живлення електродвигуна або з вихідною напругою генератора через несиметрії або нелінійності навантаження, що підключається, а також при магнітному насиченні активного сердечника;

- різким падінням рівня вібрації двигуна на частоті обертання ротора і зубцевій частоті при відключенні живлення (в початковій фазі) при дефектах обмотки збудження або вузлів кріплення полюсів ротора;

- локальним (у зоні дефекту) нагріванням корпусу двигуна при короткозамкнутих витках в обмотці або осерді статора;

- зростанням вібрації дефектного пакета статора на подвійній частоті силового струму і її гармоніках при розпушенні активного сердечника цього пакета (вимірюється вібрація пакета, при наявності засобів вимірювання шуму можливий контроль повітряного шуму в ближній до пакета зоні).

Результати вібродіагностичних досліджень, отримані в роботі, представляють у теоретичному аспекті можливість за особливостями проявів несправностей, які дає змогу виявити запропонований метод, розробити підходи для автоматизованого визначення дефектів. На основі проведеного аналізу зроблено наступні висновки, що дає можливість поставити завдання для подальшого дослідження.

В результаті аналізу невірноваженості ротора з'ясувалося, що її основною діагностичною ознакою є висока амплітуда на зворотній частоті.

Аналіз дефектів ременя показав, що через схожість ознак дефектів ременя з ознака-

ми дефектів підшипників необхідно відокремлювати складові вібрації підшипників від вібрацій ременя.

Аналіз несправностей підшипників показав, що необхідно вимірювати спектр обвідної, стежити за піками на частотах внутрішнього і зовнішнього кілець.

Аналіз дефектів електромагнітної системи електродвигуна показав, що для визначення дефектів необхідно використовувати додаткові ознаки, такі як зростання температури на корпусі двигуна, падіння амплітуди на частоті обертання при відключенні живлення, а також зростання низькочастотної вібрації.

Обговорення результатів. Розглянуто необхідність виявлення дефектів обладнання на ранній стадії їх розвитку з заданою точністю і водночас зменшення витрат на виявлення дефектів. Це, в свою чергу, вимагає детального вивчення типових дефектів вібраційного стенду, які визначаються засобами вібродіагностики, тобто уточнення діагностичних ознак дефектів.

Висновки. В роботі визначено дефекти при можливих несправностях для машинного обладнання, в ролі якого виступав навчальний стенд. Це дає можливість поставити завдання для подальшого дослідження та скласти вібродіагностичну карту, за якою стає можливим визначити несправності. За рахунок цього можна виявляти дефекти на ранній стадії їх появи з заданою точністю та водночас зменшити витрати на виявлення дефектів за рахунок відмови від дорогого обладнання.

Список використаних джерел

- [1] С. П. Тимошенко, *Колебания в инженерном деле*. Москва: Рипол Классик, 2013.
- [2] К. С. Колесников, и В. С. Зарубин, *Машиностроение: энциклопедия. Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин*, 1994.
- [3] C. M. Harris, and A. G. Piersol, *Harris' shock and vibration handbook*, vol. 5. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [4] Г. В. Зусман, А. В. Барков, и В. В. Ключев. *Вибродиагностика*, 2011.
- [5] А. Колобов, *Вибродиагностика: теория и практика*. Litres, 2019.
- [6] С. Петрухин, и В. Петрухин, *Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации*. Инфра-Инженерия, 2017.

- [7] А. В. Гулай, и В. М. Зайцев, "Интеллектуальная технология вейвлет-анализа вибрационных сигналов", *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*, № 7-8 (126), 2019.
- [8] Д. В. Омель, и А. В. Драган, "Новые подходы в вибродиагностике многовальных зубчатых приводов", *Динамика и виброакустика*, т. 6, № 1, с. 14-24, 2020. doi: 10.18287/2409-4579-2020-6-1-14-24.
- [9] В. А. Варламов, "Использование мультифрактальной параметризации для анализа смоделированных вибросигналов, характеризующих повреждения центробежных насосных агрегатов", *Перспективы науки*, № 7, с. 23-28, 2020.
- [10] E. O. Zaitsev, V. E. Sydoruk, and A. N. Shpilka, "Application of the spectrum analysis with using Berg method to develop special software tools for optical vibration diagnostics system", *Devices Methods Meas.*, vol. 7, no. 2, pp. 186-194, 2016.
- [11] А. Р. Загреддинов, А. Е. Кондратьев, и Ш. Г. Зиганшин, "Аппаратно-программное обеспечение ударно-акустического контроля композиционных конструкций", *Инженерный вестник Дона*, т. 31, № 4-1, 2014.
- [12] Ф. Н. Мирсаитов, и В. В. Болознев, "Радиоволновая диагностика газотурбинного двигателя по вибрациям лопаток турбины", на *Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций*, 2016, с. 71-73.
- [13] А. А. Козлов, А. В. Крутиков, и В. А. Старунский, *Способ формирования спектров случайной вибрации*, 2018.
- [14] А. Р. Загреддинов, А. Е. Кондратьев, и С. О. Гапоненко, "Методика расчета информативных гармоник виброакустических сигналов в применении к контролю многослойных композиционных конструкций", *Инженерный вестник Дона*, т. 31, № 4-1, 2014.
- [15] К. М. Рагульскис, А. Ю. Юркаускас, и В. В. Атступенас, *Вибрация подшипников*. Ленинград: Машиностроение, 1985.
- [16] А. В. Барков, Н. А. Баркова, и Д. В. Грищенко, *Идентификация состояния механизмов с узлами вращения по результатам вибрационного мониторинга и контроля температуры*. Санкт-Петербург: НОУ "Северо-западный учебный", 2011.
- ### References
- [1] S. P. Tymoshenko, *Fluctuations in engineering*. Moscow: Ripol Classic, 2013 [in Russian].
- [2] K. S. Kolesnikov, and V. S. Zarubin, *Mechanical engineering: encyclopedia. Dynamics and strength of machines. The theory of mechanisms and machines*, 1994 [in Russian].
- [3] C. M. Harris, and A. G. Piersol, *Harris' shock and vibration handbook*, vol. 5. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [4] G. V. Zusman, A. V. Barkov, and V. V. Kliuev, *Vibration diagnostics*, 2011 [in Russian].
- [5] A. Kolobov, *Vibration diagnostics: theory and practice*. Litres, 2019 [in Russian].
- [6] S. Petrukhin, and V. Petrukhin, *Fundamentals of vibration diagnostics and vibration measuring instruments*. Infra-Inzheneriya, 2017 [in Russian].
- [7] A. V. Gulai, and V. M. Zaitsev, "Intelligent technology of wavelet analysis of vibration signals", *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki*, no. 7-8 (126), 2019 [in Russian].
- [8] D. V. Omes, and A. V. Dragan, "New approaches in vibration diagnostics of multi-shaft gear drives", *Dinamika i vibroakustika*, vol. 6 (1), pp. 14-24, 2020 [in Russian]. doi: 10.18287/2409-4579-2020-6-1-14-24.
- [9] V. A. Varlamov, "Use of multifractal parameterization for the analysis of simulated vibration signals characterizing damage to centrifugal pumping units", *Perspektivy nauki*, no. 7, pp. 23-28, 2020 [in Russian].
- [10] E. O. Zaitsev, V. E. Sydoruk, and A. N. Shpilka, "Application of the spectrum analysis with using Berg method to develop special software tools for optical vibration diagnostics system", *Devices Methods Meas.*, vol. 7, no. 2, pp. 186-194, 2016.
- [11] A. R. Zagredinov, A. E. Kondratiev, and Sh. G. Ziganshin, "Hardware and software for shock-acoustic control of composite structures", *Inzhenernyy vestnik Dona*, vol. 31, no. 4-1, 2014 [in Russian].
- [12] F. N. Mirsaitov, and V. V. Boloznev, "Radio wave diagnostics of a gas turbine engine by vibrations of turbine blades", in *Aktualnyye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy*, 2016, pp. 71-73 [in Russian].

- [13] A. A. Kozlov, A. V. Krutikov, and V. A. Starunskiy, *A method for generating random vibration spectra*, 2018 [in Russian].
- [14] A. R. Zagretidinov, A. E. Kondratiev, and S. O. Gaponenko, "Methodology for calculating informative harmonics of vibroacoustic signals as applied to the control of multilayer composite structures", *Inzhenernyy vestnik Dona*, vol. 31, no. 4-1, 2014 [in Russian].
- [15] K. M. Ragulskis, A. Yu. Yurkauskas, and V. V. Atstupenas, *Vibration of bearings*. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1985 [in Russian].
- [16] A. V. Barkov, N. A. Barkova, and D. V. Grishchenko, *Identification of the state of mechanisms with rotation units based on the results of vibration monitoring and temperature control*. St. Petersburg: NOU "Severo-zapadnyi uchebnyi", 2011 [in Russian].

A. P. Stakhova, Ph.D., associate professor,
e-mail: sap@nau.edu.ua

V. P. Kvasnikov, D.Tech.Sc., professor
National Aviation University
Liubomyr Huzar ave., 1, Kyiv, 03058, Ukraine

AUTOMATION OF DETECTION OF MACHINE EQUIPMENT DEFECTS BY VIBRODIAGNOSTICS

The paper defines that the urgent task is the timely detection of the dangerous state of the mechanism, i.e. the need to minimize the probability of missing a developed defect, sufficient for an emergency situation between the periodic measurements of controlled parameters. It is shown that the measurement of the level of vibration of the machine equipment at different modes of its operation allows to predict the efficiency of the device during the service life. The paper identifies possible malfunctions of machinery, in the role of which is a training stand, and the compilation of a vibration diagnostic map, which identifies faults. The need to detect equipment defects at an early stage of their development with high accuracy, but at the same time to reduce the cost of detecting defects is considered. This, in turn, requires a detailed study of typical defects of the vibrating stand, which are determined by vibration diagnostics, i.e. clarification of diagnostic signs of defects.

Based on the obtained research results, the following conclusions have been obtained: as a result of the analysis of rotor imbalance, it becomes clear that a high amplitude at the reverse frequency is its main diagnostic feature; the analysis of defects of a belt shows that because of similarity of signs of defects of a belt with signs of defects of bearings it is necessary to separate components of vibrations of bearings from vibrations of a belt; the analysis of faults of bearings shows that it is necessary to measure the spectrum of the bypass, to monitor the peaks at the frequencies of inner and outer rings; the analysis of defects in electromagnetic system of the motor shows that to identify defects it is necessary to use additional features such as an increase in temperature on the motor housing, a drop in amplitude at speed when the power is off, and an increase in low frequency vibration.

Therefore, the defects of possible malfunctions for the machine equipment, in the role of which the training stand acts, have been determined in the work. This allows to make a vibration diagnostic card, which is used to identify faults. Solving this problem allows to detect defects at an early stage of their appearance with high accuracy and at the same time reduce the cost of detecting defects.

Keywords: oscillations, vibrations, vibration parameters, vibrating stand, operational defects.

[0000-0002-9625-4798] **А. Л. Передерко, к.т.н.**

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку,
вул. Кузнечна, 1, м. Одеса, 65023, Україна
e-mail: pal88@ukr.net

ЗАСОБИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИНАМІЧНОГО ДІАПАЗОНУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ

У статті розглянуто можливість розширення динамічного діапазону вимірювального каналу, в якому первинним перетворювачем є п'єзоелектричний акселерометр, який вимірює прискорення при проведенні динамічних (ударних) випробувань різних зразків техніки. Часто ударні випробування проводяться в умовах важкої відтворюваності умов експерименту, наприклад, вимірювання ударів і вібраційних впливів при піротехнічних вибухах, випробування бортових систем спеціального призначення на витривалість, здатність витримувати руйнацію тощо, де внаслідок швидкоплинності вимірювальних процесів атенюатори автоматичного вибору діапазону вимірювання не встигають здійснити комутацію при перевищенні вхідним сигналом нормованої величини або ці перемикання ведуть, як наслідок, до комутаційних розривів ланцюга, спотворення вимірюваного сигналу. Тому застосування атенюаторів в таких випадках є недоцільним. Таким чином, необхідну величину динамічного діапазону вимірювального каналу потрібно забезпечити виключно схемними рішеннями. Другий чинник, який потребує забезпечити процес вимірювання прискорення, – це відношення сигнал/шум. Беручи до уваги, що при вимірюванні ударних впливів для забезпечення динамічного діапазону по прискоренню вибирають п'єзоелектричні акселерометри (генерують заряд) з чутливістю до 10 пК/мс^2 , наявність широкопasmових шумів буде суттєво спотворювати вимірюваний сигнал. Особливо це буде відбиватися при низьких рівнях амплітуди прискорення, під час загасання ударного імпульсу та виникнення перехідних процесів, які потребують дослідження.

Ключові слова: прискорення, п'єзоелектричний акселерометр, аналого-цифровий перетворювач, відношення сигнал/шум, динамічні випробування.

Вступ. Для забезпечення достовірного вимірювання і управління в технічних системах сучасний розвиток техніки вимагає наявності високоточних засобів вимірювальної техніки, які дають можливість вимірювати технологічні параметри при експлуатації та оптимізувати процеси створення нових зразків на етапі проектування і проведення випробувань.

В останні роки широкого застосування набувають вимірювально-інформаційні системи вібраційного аналізу, контролю, моніторингу, діагностики, активного віброзахисту та автоматичного управління складними технічними системами і технологічними процесами, що не тільки дають великий техніко-економічний ефект, але й сприяють запобіганню аварій і можливих техногенних та екологічних катастроф на ранніх стадіях їх розвитку.

В широкому спектрі вимірюваних технічних величин особливе місце займають вимірювання вібраційних (ударних) параметрів

механічних систем. Це такі параметри, як прискорення, швидкість та переміщення.

Вимірювання вібрації та ударів, аналіз їх параметрів при дослідженні коливальних процесів на етапах розробки, випробування та експлуатації різноманітних технічних і технологічних пристроїв, в різних галузях (енергетиці, машинобудуванні, авіаційній і ракетно-космічній промисловості, суднобудуванні, нафто-газовидобувній та переробній промисловості, медицині), а також проведення динамічних випробувань дає можливість контролювати правильність застосованих конструктивних рішень. У сучасному обігу існує такий термін, як віброметрія, який є сукупністю засобів і методів для вимірювання параметрів вібрації та ударів, їх обробки та аналізу.

Необхідно відзначити, що цією тематикою займаються наукові групи провідних вітчизняних технічних вишів, таких як НТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», НАУ ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» та ін.

При створенні зразків нової техніки проводять натурні ударні випробування як окремих вузлів, так і всього виробу. Перетворення вимірювальної інформації при проведенні динамічних (ударних) випробувань, як правило, здійснюється за допомогою п'єзоелектричних датчиків прискорення.

Ударні випробування часто є однократними, коли проходить руйнування досліджуваних зразків, що значно підвищує вимоги до калібрування та задання параметрів засобів вимірювання. П'єзоелектричні акселерометри, що використовуються при дослідженні, мають яскраво виражені резонансні властивості. Робочий діапазон датчика покриває не більше половини його резонансної частоти. Початкова інформація про різні ударні впливи має значні розбіжності, адже отримується на основі досить грубих оцінок. У такому разі при проведенні випробувань спектр вібраційного впливу може досягти резонансної частоти датчика, що призводить до перевантаження вимірювального каналу. До того ж, досить низькочастотний ударний вплив може супроводжуватися високочастотними механічними збуреннями, що також призводить до перевантаження вимірювального каналу. Комутацію коефіцієнтів прискорення та вимірювання частотних характеристик у вимірювальному каналі здійснювати дуже важко (а в процесі випробувань іноді взагалі неможливо). Тому забезпечення необхідного динамічного діапазону, щоб уникнути застосування комутаційних дій стосовно сигналу вимірювання, є актуальним завданням.

Метою роботи є дослідження динамічного діапазону та відношення сигнал/шум дельта-сигма аналого-цифрового перетворювача з метою його застосування в схемі вимірювання прискорення за допомогою п'єзоелектричного акселерометра.

Основна частина. Для забезпечення динамічного діапазону вимірювального каналу в фахових джерелах пропонується використовувати такі апаратні й алгоритмічні засоби [1, 3, 4]:

- високорозрядний аналого-цифровий перетворювач з великою роздільною здатністю;
- високоефективну фільтрацію вхідного сигналу.

Основними критеріями вибору аналого-цифрового перетворювача (АЦП) є роздільна здатність і частота дискретизації. Згідно з теоремою вибірки Найквіста достатньо виб-

рати частоту дискретизації, яка в два рази вища, ніж найвища частотна складова, наявна в спектрі вимірюваного сигналу, щоб отримати правильну інформацію про цей сигнал [6, 14]. Однак через високі вимоги до фільтра згладжування не рекомендується вибирати частоту дискретизації занадто близькою до частоти Найквіста.

Таким чином, у звичайних АЦП аналоговий сигнал оцифровується на частоті дискретизації і далі квантується по декількох рівнях, в результаті чого отримують цифровий сигнал у паралельному або послідовному коді [5, 8]. Цей процес вводить так званий шум похибки квантування.

Запобігти цьому можливо, застосувавши метод передискретизації вимірюваного сигналу.

Передискретизація з коефіцієнтом, не меншим 100, істотно знизить вимоги до фільтра згладжування. Крім того, більш висока частота дискретизації покращує частотну роздільну здатність при подальшій обробці сигналу, наприклад швидкому перетворенню Фур'є (якщо перетворення застосовується до записаного цифрового сигналу) і дає змогу усереднювати, що приводить до кращого відношення сигнал/шум [4, 10, 15]. Тобто, наприклад, припускаючи, що у вібраційному сигналі ми очікуємо компоненти сигналу, не вищі 10 кГц, буде досить перетворювача з частотою дискретизації на рівні 1 Mbps (мегабіт на секунду).

Зазвичай вимоги до частоти дискретизації сигналу дуже залежать від сфери застосування і, зокрема, від режиму роботи проектованої вимірювальної системи. Якщо система має працювати в імпульсному режимі, тобто вимірювання удару, вібраційний відгук на такі імпульси повинен реєструватися з високою роздільною здатністю по часу, то, звичайно, можуть знадобитися більш високі частоти дискретизації.

Розглянемо концепцію передискретизації [6] в процесі перетворення вимірюваного сигналу в цифровий код, для чого проведемо аналіз у частотній області.

Якщо розглянути як приклад синусоїдальний сигнал на вході традиційного АЦП (паралельного перетворення або послідовного наближення), то згідно з критерієм Найквіста мінімальна частота дискретизації визначається вдвічі більшою за верхню границю полоси зазначеного сигналу.

Для нашого прикладу синусоїди ми бачимо, що на амплітудно-частотній характеристиці (АЧХ) сигналу, який нас цікавить, також є наявність шуму, як показано нижче на рисунку 1.

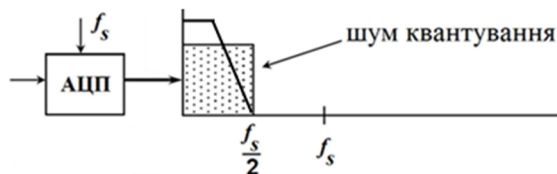


Рисунок 1 – АЧХ АЦП без передискретизації

На рисунку 1 позначено: f_s – частота Найквіста.

Тобто перетворення аналогового сигналу в цифровий призводить до появи шуму в сигналі, який називається шумом квантування. Для одного цифрового відліку шум просто становить $\pm 1/2$ молодшого розряду (LSB). Чим менший LSB, тим вищою буде роздільна здатність АЦП. Більш висока роздільна здатність має на увазі більш низький шум квантування або більш високе відношення сигнал/шум (SNR). Класичне рівняння, яке відображає зв'язок між дозволом АЦП і SNR, показано в рівнянні (2), де N – ефективна кількість бітів дозволу АЦП [13].

Природа шуму квантування обумовлена тим, що вибірки безперервної вхідної синусоїди можуть приймати лише кінцеву кількість дискретних відліків, визначених роздільною здатністю АЦП. Ця випадкова похибка квантування e існує в діапазоні частоти Найквіста та поширюється до $f_s/2$, і може бути описана як:

$$e = \frac{\pm q}{2} = \pm A \cdot 2^{-N}, \quad (1)$$

де A – амплітуда опорного сигналу, яка охоплює діапазон від A до $-A$, q – це найменше значення напруги, яке може бути виміряне АЦП-величиною, ($q = \frac{2A}{2^N}$), N являє собою кількість бітів квантування сигналу).

З (1) ми можемо визначити відношення сигнал/шум квантування як:

$$10 \log_{10} \frac{P_s}{P_e} = 1.76 + 6.02N, \text{ дБ.} \quad (2)$$

У формулі (2) P_s – потужність сигналу, P_e – потужність шуму.

Таким чином, в АЦП із частотою дискретизації Найквіста ми покращуємо відношення сигнал/шум квантування, збільшуючи роздільну здатність (N) АЦП.

Якщо замість цього ми збільшимо частоту передискретизації з f_s на Kf_s (де K – коефіцієнт передискретизації), то шум квантування в області $f_s/2$, як зображено на рисунку 2, зменшується. Відношення сигнал/шум квантування насправді однакове, однак шум квантування поширюється на більший діапазон частот. Завдяки включенню фільтра в АЦП дельта-сигма можна зменшити частину цього шуму квантування. Таким чином, це зменшення шуму квантування в робочому діапазоні частот дає змогу схемі дельта-сигма виконувати аналого-цифрові перетворення з високою роздільною здатністю.

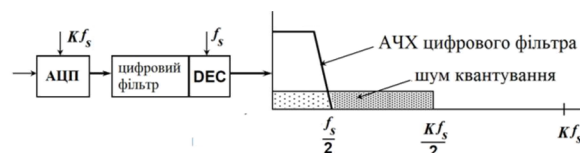


Рисунок 2 – АЧХ АЦП з передискретизацією

На рисунку 2 позначено: DEC – дециматор. Дециматор [2, 6] здійснює проріджування – це процес відкидання зайвих вибірок, який використовується як механізм для зниження частоти даних до корисного значення при збереженні інформації відповідно до критерію Найквіста.

Відношення сигнал/шум квантування покращується на 6 дБ, якщо ми збільшимо частоту дискретизації в чотири рази [9, 11]. Інакше кажучи, кожний раз, коли ми в чотири рази збільшуємо частоту дискретизації, ми отримуємо еквівалент додавання 1 біта до роздільної здатності АЦП. Тільки за умови передискретизації, щоб досягти 12-бітової роздільної здатності, вхідний сигнал повинен бути передискретизований у 411 разів, або, загальніше, для збільшення роздільної здатності на N -біт ми повинні передискретизувати сигнал в $22N$ рази.

Тому, щоб забезпечити посилення більше 6 дБ, використовуємо інший метод, відомий як формування шуму, який також реалізується в дельта-сигма ($\Sigma\Delta$) АЦП.

Блок-схему модулятора дельта-сигма першого порядку зображено на рисунку 3.

Апаратна архітектура дельта-сигма АЦП складається з інтегратора, компаратора і однорозрядного цифро-аналогового перетворювача (ЦАП), які розташовані в контурі негативного зворотного зв'язку, як показано на рисунку 3. На схему інтегратора подається сума вхідного сигналу й інвертованого вихідного сигналу ЦАП. Вихідний сигнал інтегратора – це лінійний сигнал, крутизна якого пропорційна його входу. Вихід інтегратора порівнюється з опорним сигналом компаратора для генерації 0 або 1. Двійковий вихід компаратора синхронізується з цифровим децимаційним фільтром на кожному фронті перевищення тактової частоти f передискретизації АЦП. Кожний біт представляє напрямок виходу інтегратора по відношенню до опорного сигналу компаратора, і після декількох ітерацій бітовий потік нагадує квантоване значення вхідного сигналу. По суті, контур зворотного зв'язку працює так, що середній вихідний сигнал ЦАП відповідає вхідному сигналу. Цифровий децимаційний фільтр усереднює бітовий потік для виведення n -бітової вибірки з бажаною частотою дискретизації f_s .

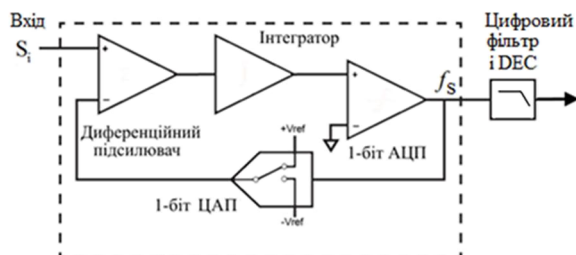


Рисунок 3 – Блок-схема модулятора дельта-сигма АЦП першого порядку

На рисунку 3 позначено: S_i – вхідний сигнал, S_o – вихідний сигнал.

В архітектурі дельта-сигма (рисунок 3): якщо вхідний сигнал збільшився, то 1-бітовий АЦП, який є просто компаратором, генерує одиницю. Якщо він зменшився, він генерує нуль. Таким чином, модулятор дельта-сигма передає зміни або градієнт вхідного сигналу.

Дельта-сигма АЦП використовують частоти дискретизації, які в кілька разів перевищують частоту дискретизації, достатню для цього сигналу, наприклад в 128 разів. Так, для дискретизації сигналу 25 кГц досить буде частоти дискретизації, що перевищує частоту Найквіста (тобто > 50 кГц). Однак $\Sigma\Delta$ АЦП, який використовує коефіцієнт пе-

редискретизації 128, вибирає сигнал на частоті 6 МГц. Цей підхід має кілька переваг, таких як краще згладжування і більш висока роздільна здатність.

У частотній області дискретизація сигналу ефективно модулює спектр вхідного сигналу з несучими частотами, які кратні частоті дискретизації f_s (тобто $0, f_s, 2f_s, 3f_s$ і т. д.). Щоб гарантувати, що ці модульовані версії спектра вхідного сигналу не перекриваються, що призводить до накладання спектрів, частота дискретизації має бути більш ніж у два рази більшою максимальної частотної складової сигналу (тобто $2f_{\max}$), частоти Найквіста. І навпаки, якщо вхідний сигнал має частотні компоненти вище $f_s/2$, також званої частотою Найквіста, ці компоненти можуть накладатися на частотний діапазон субчастот Найквіста, що ускладнює виявлення сигналів (інформативних), які становлять інтерес, серед псевдонімів. Цей ефект накладення спектрів проявляється у вигляді шуму і спотворення сигналу.

Для запобігання накладенню спектрів аналоговий інтерфейс пристрою збору даних часто використовує аналоговий фільтр нижніх частот, який послаблює частотні складові, що перевищують частоту Найквіста, перед дискретизацією АЦП. До таких фільтрів ставлять високі вимоги, адже очікується, що вони будуть мати характеристики, які нагадують плоску характеристику в смузі пропускання і різкий спад. При таких жорстких обмеженнях і тому факті, що вони повинні бути реалізовані як аналогові схеми, ці фільтри є складними в конструкції та налаштуванні і, як наслідок, дорогими у виробництві.

Дельта-сигма АЦП не вимогливі до аналогових фільтрів згладжування за рахунок передискретизації вхідного сигналу, як показано на рисунку 5. Завдяки передискретизації модульовані складові спектра вхідного сигналу додатково поділяються в частотній області. Це дає змогу отримати характеристики фільтра з поступовим спадом, що значно спрощує конструкцію аналогового фільтра антиаліасинга (технологія, що використовується в обробці сигналів з метою зробити межі кривих ліній більш гладкими). Дельта-сигма АЦП складаються в основному з цифрових компонентів, що робить їх ще більш привабливими. Маючи в основному цифрову конструкцію, вони можуть бути реалізовані на однокристальних

чіпах і, таким чином, використовувати переваги технології інтегральної побудови.

Потік бітів з дельта-сигма модулятора виводиться на цифровий децимаційний фільтр, який усереднює і субдискретизує сигнал, створюючи таким чином n -бітову вибірку з необхідною частотою дискретизації f_s . Цей процес усереднення має ефект фільтрації нижніх частот сигналу в частотній області, що послаблює шум квантування і видаляє помилкові імпульси зі смуги корисного сигналу. Цей децимаційний фільтр зазвичай будується з абсолютно пласкою частотною характеристикою в смузі пропускання з відсутністю фазових зрушень та різкого спаду близько частоти зрізу (приблизно $0,49$ частоти дискретизації f_s) і має високий коефіцієнт придушення в смузі загородження, що робить його дуже ефективним при операції згладжування. Цифровий фільтр проріджування зазвичай реалізується як фільтр з кінцевою імпульсною характеристикою (КИХ), такий як гребінчастий фільтр, який є економним способом реалізації проріджування.

Також дельта-сигма модулятор діє як фільтр нижніх частот для сигналу і фільтр верхніх частот для шуму квантування, таким чином переміщуючи шум в області більш високих частот, як показано на рисунку 5. Це явище називається формуванням шуму квантування і створюється за рахунок використання цифрового проріджування, яке ефективно фільтрує нижні частоти на виході модулятора і видаляє шум квантування. Зниження потужності шуму в смузі частот, де знаходяться частоти вимірюваного сигналу, означає більш високе співвідношення сигнал/шум або більший динамічний діапазон, оскільки мінімальний рівень шуму був значно знижений.

Це поліпшення відношення сигнал/шум за допомогою передискретизації можна побачити в рівнянні (3):

$$SNR = 6.02N + 1.76 + 10 \log \left(\frac{K \cdot f_s}{2HW} \right), \quad (3)$$

де f_s – частота дискретизації, K – коефіцієнт передискретизації, а HW – ширина смуги вхідного сигналу.

Це збільшення відношення сигнал/шум призводить до збільшення ефективної кількості бітів дозволу АЦП.

Як і при передискретизації, формування шуму найкраще пояснюється в частотній об-

ласті. Модель частотної області модулятора зображено на рисунку 4.

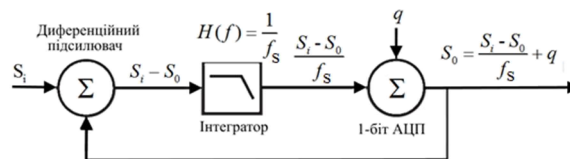


Рисунок 4 – Модель частотної області дельта-сигма модулятора

Інтегратор на рисунку 4 діє як фільтр низьких частот по відношенню до вхідного сигналу. Шум квантування додається до вихідного сигналу цього фільтра через 1-бітовий процес перетворення. Вихід модулятора можна представити, використовуючи рівняння (4):

$$S_0 = \frac{S_i + q \cdot f_s}{f_s + 1} = \frac{S_i}{f_s + 1} + \frac{q \cdot f_s}{f_s + 1}. \quad (4)$$

Перший член у цьому рівнянні можна вважати складовою сигналу, а другий член – складовою шуму. Оскільки частота наближається до нуля, можна бачити, що доданок шуму наближається до нуля, а вихід модулятора наближається до S_i . Зі збільшенням частоти коефіцієнт шуму наближається до q , а сигнал – до нуля. Таким чином, інтегратор діє як фільтр високих частот для шуму квантування. На рисунку 5 зображено АЧХ дельта-сигма АЦП.

ΣΔ АЦП вищого порядку з більш ніж однією стадією інтеграції та підсумовування в модуляторі може бути використана для досягнення подальшого формування шуму в більш високій області частот.

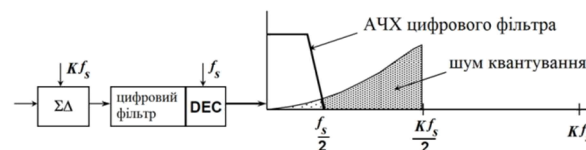


Рисунок 5 – Амплітудно-частотна характеристика дельта-сигма АЦП

Результати досліджень. За викладеними підходами було розроблено принципову схему дельта-сигма АЦП та проведено симуляцію її роботи в середовищі Multisim.

Моделювання схеми (рисунк 6) проводилося на реальних електронних компонентах з бібліотеки зазначеного середовища.

Як операційний підсилювач було обрано ОРА192 (виробник Texas Instruments). Зазна-

чена мікросхема не має аналогів у галузі та створюється за запатентованою технологією підгонки параметрів, яка виконується після корпусування мікросхеми. Зазначений операційний підсилювач, без використання внутрішньої автопідстройки нуля, забезпечує напругу зсуву в 5 мкВ і температурний дрейф зміщення 0,2 мкВ/°C. Його застосування дає можливість збільшити точність схем обробки сигналів промислових датчиків та поліпшити їх шумові характеристики.

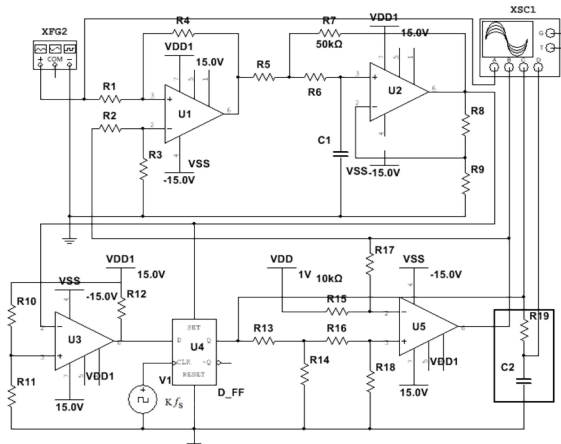


Рисунок 6 – Схема моделювання дельта-сигма АЦП першого порядку в Multisim

Осцилограми роботи схеми, отримані при проведенні моделювання, зображено на рисунку 7.



Рисунок 7 – Осцилограми роботи дельта-сигма АЦП (схема наведена на рисунку 6)

На елементах R19, C2 (рисунок 6), для прикладу, зібраний фільтр, на якому відновлюється вхідний сигнал (верхня синусоїда на рисунках 7, 8) і вихідний, після перетворень в $\Sigma\Delta$ АЦП (нижній сигнал на рисунках 7, 8). Як видно з осцилограм, сигнал має чітке відт-

ворення по формі з невеликим запізненням по фазі (видно по маркерах на рисунку 7).

На рисунку 8 проведено моделювання складного сигналу (композитний сигнал складної частотної реалізації).

На кожному етапі децимації (рисунок 5) кількість бітів слова збільшується, оскільки ми маємо децимацію, яка зменшує частоту в 64 рази, а розмір бітів слова конвертора становить 6 біт.

Для цих значень відношення сигнал/шум розробленого перетворювача дельта-сигма становить 56 дБ. Динамічний діапазон по напрузі [7, 12] при чутливості п'єзоелектричного акселерометра 5 пК/мс² – 70 дБ.



Рисунок 8 – Осцилограми роботи дельта-сигма АЦП (схема наведена на рисунку 6)

Обговорення результатів. АЦП дельта-сигма пропонує високу роздільну здатність з ENOB (ефективну кількість бітів) від 20 до 24 біт. Це робить їх хорошим вибором для забезпечення прецизійних вимірювань. Тобто дельта-сигма АЦП реалізує передискретизацію для досягнення високої роздільної здатності при квантуванні аналогового сигналу та децимаційну фільтрацію при перехідній фільтрації згладжування (зворотне перетворення).

Інший аспект, який впливає з методу передискретизації в дельта-сигма АЦП, – це вибір компромісу між швидкістю перетворення та роздільною здатністю. Фактично фільтр децимації, що знаходиться після модулятора, не тільки фільтрує всю бітову послідовність оцифрованого сигналу в діапазоні (виризаючи шум на більш високих частотах), але також зменшує частоту сигналу, підвищуючи роздільну здатність. Це отримується за рахунок деякого усереднення високошвидкісного потоку бітів.

Висновок. Завдяки проведенню моделювання перевірено функціональність дельта-сигма АЦП та підтверджено придатність аналого-цифрових перетворювачів цього типу для застосування у вимірювальному каналі для обробки сигналу з п'єзоелектричного перетворювача. Цей АЦП забезпечує необхідний динамічний діапазон та має високі експлуатаційні шумові показники. Незважаючи на простоту реалізації, він має прийнятну швидкість перетворення аналогового сигналу в цифровий код та покращене відношення сигнал/шум порівняно з даними на інші типи перетворювачів.

В перспективі будуть проведені подальші дослідження шляхів поліпшення параметрів вимірювального каналу вібраційного прискорення. Буде розроблено, промодельовано та оптимізовано фільтр-дециматор на базі мікроконтролера. Це дасть можливість завершити процес проектування аналого-цифрового перетворювача для каналу вимірювання вібраційних та ударних впливів.

Список використаних джерел

- [1] "Application Note AN-283: Sigma-Delta ADCs and DACs", *Applications Reference Manual*. Analog Devices, 1993, pp. 18-20.
- [2] J. C. Candy, and O. J. Benjamin, "The structure of quantization noise from sigma-delta modulation", *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-29, pp. 1316-1323, 1981.
- [3] W. Kester, J. Bryant, and J. Buxton, "ADCs for signal conditioning", *Practical Design Techniques for sensor signal conditioning*, Analog Devices, 1999, pp. 8.1-8.39.
- [4] Martin J. W. Schubert, *Delta sigma modulation. The art of oversampling, noise shaping and averaging. Electronic labor*. Hochschule Regensburg University of Applied Sciences.
- [5] S. R. Norsworthy, and R. Schreier, "Delta-sigma data converters: Theory, design and simulation", *IEEE Press*, 1996.
- [6] D. G. Zurich, *Circuits and systems based on delta modulation: Linear, nonlinear and mixed mode processing (signals and communication technology)*. Springer, 2005.
- [7] В. И. Диденко, и А. В. Иванов, "Метрологический подход к исследованию шума квантования дельта-сигма АЦП", *Измерительная техника*, № 5, с. 51-55, 2009.
- [8] В. И. Диденко, А. В. Иванов, и А. С. Воронов, "Шум квантования дельта-сигма

аналого-цифрового преобразователя для различных законов изменения входного сигнала", *Измерительная техника*, № 4, с. 57-61, 2013.

- [9] Г. Лэм, *Аналоговые и цифровые фильтры. Расчет и реализация*. Москва: Мир.
- [10] В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, и Е. В. Шарапова, *Пьезоэлектрические датчики*. Москва: Техносфера, 2006.
- [11] Э. К. Шахов, "Дельта-сигма-АЦП: классификация и математические модели", *Датчики и системы*, № 12, с. 69-76, 2006.
- [12] Э. С. Айфинчер, и Б. У. Джервис, *Цифровая обработка сигналов: практический подход*. Москва: ИД "Вильямс", 2004.
- [13] А. Махлин, "Дельта-сигма модуляция: назад в будущее", *Компоненты и технологии*, № 11, с. 154-158, 2010.
- [14] Б. Скляр, *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение*, 2-е изд. Москва: ИД "Вильямс", 2003.
- [15] В. А. Погрибной, *Дельта-модуляция в цифровой обработке сигналов*. Москва: Радио и связь, 1990.

References

- [1] "Application Note AN-283: Sigma-Delta ADCs and DACs", *Applications Reference Manual*. Analog Devices, 1993, pp. 18-20.
- [2] J. C. Candy, and O. J. Benjamin, "The structure of quantization noise from sigma-delta modulation", *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-29, pp. 1316-1323, 1981.
- [3] W. Kester, J. Bryant, and J. Buxton, "ADCs for signal conditioning", *Practical Design Techniques for sensor signal conditioning*, Analog Devices, 1999, pp. 8.1-8.39.
- [4] Martin J. W. Schubert, *Delta sigma modulation. The art of oversampling, noise shaping and averaging. Electronic labor*. Hochschule Regensburg University of Applied Sciences.
- [5] S. R. Norsworthy, and R. Schreier, "Delta-sigma data converters: Theory, design and simulation", *IEEE Press*, 1996.
- [6] D. G. Zurich, *Circuits and systems based on delta modulation: Linear, nonlinear and mixed mode processing (signals and communication technology)*. Springer, 2005.
- [7] V. I. Didenko, and A. V. Ivanov, "Metrological approach to the study of quantization noise of delta-sigma ADC", *Izmeritelnaya tekhnika*, no. 5, pp. 51-55, 2009 [in Russian].

- [8] V. I. Didenko, A. V. Ivanov, and A. S. Voronov, "Quantization noise of a delta-sigma analog-to-digital converter for different laws of variation of the input signal", *Izmeritelnaya tekhnika*, no. 4, pp. 57-61, 2013 [in Russian].
- [9] G. Lem, *Analog and digital filters. Calculation and implementation*. Moscow: Mir [in Russian].
- [10] V. M. Sharapov, M. P. Musienko, and E. V. Sharapova, *Piezoelectric sensors*. Moscow: Tekhnosfera, 2006 [in Russian].
- [11] E. K. Shakhov, "Delta-sigma-ADC: classification and mathematical models", *Datchiki i sistemy*, no. 12, pp. 69-76, 2006 [in Russian].
- [12] E. S. Ajfincher, and B. U. Dzhervis, *Digital signal processing: A practical approach*. Moscow: ID "Vilyams", 2004 [in Russian].
- [13] A. Makhlin, "Delta-sigma modulation: Back to the future", *Komponenty i tekhnologii*, no. 11, pp. 154-158, 2010 [in Russian].
- [14] B. Sklyar, *Digital communication. Theoretical foundations and practical application*, 2-nd ed. Moscow: ID "Vil'yams", 2003 [in Russian].
- [15] V. A. Pogribnoj, *Delta modulation in digital signal processing*. Moscow: Radio i svyaz, 1990 [in Russian].

A. L. Perederko, Ph.D.

State University of Intellectual Technologies and Communications
Kuznechnaya st., 1, Odesa, 65023, Ukraine
e-mail: pal88@ukr.net

MEANS OF PROVIDING DYNAMIC RANGE OF THE MEASURING CHANNEL

The article considers the possibility of expanding the dynamic range of the measuring channel, in which the primary transducer is a piezoelectric accelerometer, which measures the acceleration during dynamic (shock) tests of various samples of equipment. Impact tests are often performed in conditions of difficult reproducibility of experimental conditions, for example, measurement of shocks and vibrations in pyrotechnic explosions, tests of special purpose onboard systems for endurance, ability to withstand destruction, etc., where due to the transient nature of measurement processes, the attenuators of the automatic selection of the measurement range do not have time to switch when the input signal exceeds the normalized value, or these switches lead, as a consequence, to circuit breaks, to distortion of the measured signal. Therefore, the use of attenuators in such cases is impractical.

Thus, the required value of the dynamic range of the measuring channel must be provided exclusively by circuit solutions. The second factor that needs to ensure the acceleration measurement process is the signal-to-noise ratio. Given that when measuring shock effects, piezoelectric accelerometers (generating charge) with a sensitivity of up to 10 pK/ms² are chosen to ensure the dynamic range of acceleration, the presence of broadband noise will significantly distort the measured signal. This will be especially reflected at low levels of acceleration amplitude, during the attenuation of the shock pulse and the emergence of transients that require research. Also large electromagnetic, vibration, temperature impacts influence measuring devices and the equipment from the environment as the specified tests, in most cases, are carried out not in laboratory conditions, and on specialized landfills. Therefore, the design and development of measuring instruments to ensure these tests is of great importance and relevance.

Keywords: acceleration, piezoelectric accelerometer, analog-to-digital converter, signal-to-noise ratio, dynamic tests.

[0000-0002-6525-9721] **В. П. Квасніков**, д.т.н., професор,
[0000-0002-1586-1861] **М. О. Катаєва**, к.т.н.

e-mail: kataeva.mariia@gmail.com

Національний авіаційний університет
просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна

АНАЛІЗ І КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ РЕЛЬЄФУ НАНООБ'ЄКТІВ

У статті проведено аналіз наявних методів та засобів вимірювання рельєфу нанооб'єктів і розроблено їх класифікацію на основі принципів використання. Розглянуто основні інформаційні параметри, на яких базується кожний описаний метод, та визначено умови їх найбільш ефективного застосування для вирішення задач вимірювання рельєфу нанооб'єктів. На основі проведеного аналізу було встановлено, що найбільш функціональним та універсальним при вирішенні широкого кола проблем є метод скануючої зондової мікроскопії. Розроблено класифікацію наявних методів скануючої зондової мікроскопії залежно від характеру їх застосування. Доведено, що збільшення кількості методів вимірювання, що використовуються при метрологічному аналізі нанооб'єктів, збільшить надійність і точність результатів вимірювань, і кожний метод забезпечить додаткові інформаційні параметри. Рекомендовано для підвищення точності нановимірювань використовувати методики, побудовані за принципом інтеграції інформації, наданої різними методами.

Ключові слова: нанотехнології, нановимірювання, метрологія, методи та засоби вимірювання, наноматеріали.

Вступ. В останні роки дослідження субмікронних, нано- та кластерних матеріалів отримало швидкий розвиток у багатьох галузях науки та техніки. Протягом кількох десятиків років практично в усіх розвинених країнах світу в різних галузях народного господарства спостерігається стрімкий прогрес у сфері нанотехнологій.

Підвищення ефективності виробництва і якості виробів, розвиток електронної техніки і біомедичних приладів, а також створення нових наноструктурованих матеріалів з особливими властивостями значною мірою визначаються точністю та прецизійністю метрологічного забезпечення.

Варто зазначити, що дослідження, спрямовані на вдосконалення інструментального забезпечення нанотехнологій, вийшли на новий прогресивний рівень. Безумовно, масштабний розвиток наноіндустрії неможливий без відповідного метрологічного забезпечення (МЗ). У зв'язку з цим актуальною є проблема удосконалення наявних і розробки нових методів вимірювання й оцінювання фізико-механічних властивостей нанооб'єктів. На особливу увагу заслуговує проблема вимірювання параметрів рельєфу нанооб'єктів, адже, спираючись на попередні дослідження вітчиз-

няних і закордонних вчених [1-7] в цій галузі, можна стверджувати, що досі не існує універсальної методики, яка б враховувала всі зовнішні дестабілізуючі фактори та специфічні властивості наноматеріалів.

Мета дослідження. Метою роботи є ґрунтовний аналіз наявних методів і засобів проведення вимірювань рельєфу нанооб'єктів, їх класифікація та визначення основних характеристик, що буде слугувати основою для удосконалення наявних і створення нових методів та методик вимірювання рельєфу нанооб'єктів.

Постановка проблеми. Суть нановимірювань полягає в тому, щоб працювати на молекулярному рівні для дослідження структур з принципово новими властивостями. Одна з основних проблем при роботі з нанооб'єктами та наноструктурами пов'язана з наднизькими рівнями сигналу. Іншою проблемою є широкий діапазон поведінки, яку можуть проявляти вимірювальні об'єкти і компоненти.

Наприклад [8], вимірювальні нанооб'єкти з полімерних матеріалів можуть мати опір понад 1 ГОм. Однак, будучи втягнутим у волокна діаметром менше 100 нм і легованими різними наночастинками, полімер може

перетворитися з чудового ізолятора на високотоківний дріт. Результат – надзвичайно широкий діапазон тестових сигналів. Для виявлення слабких електричних сигналів у нижній частині діапазону потрібні високочутливі інструменти з високою роздільною здатністю.

Також важливим аспектом є те, що для вимірювань постійного струму може знадобитися характеристика деяких пристроїв і структур радіочастотними сигналами [9-11]. Це вимагає суворого проектування засобів вимірювання з надійними ВЧ-з'єднаннями з малими втратами вимірювальної голівки і спеціальною електронною схемою для кожного окремого шляху проходження сигналу. В іншому

випадку буде неможливо досягти розділення, необхідного для прецизійних нановимірювань.

Отже, методи й інструменти вимірювання повинні звести до мінімуму шум та інші джерела похибок, які можуть перешкодити сигналу, та враховувати специфічні особливості наноматеріалів.

Не менш важливим фактором є те, що метрологічні засоби нановимірювань повинні бути простими у використанні та економічними.

Виклад основного матеріалу. В таблиці 1 наведено класифікацію найбільш вживаних методів вимірювання рельєфу наноб'єктів та їх основні характеристики.

Таблиця 1 – Класифікація основних методів вимірювання наноб'єктів

№	Найменування	Загальні характеристики
1. Скануюча тунельна мікроскопія (СТМ)		
1.4.	Метод I (z) спектроскопії	Вимірює тунельний струм залежно від відстані між зондом та зразком у кожній точці СТМ-зображення
1.5.	Метод I (v) спектроскопії	Передбачає одночасне отримання зображення рельєфу при фіксованих значеннях струму I_0 і напруги зсуву V_0
2. Контактна скануюча атомно-силова мікроскопія (Касма)		
2.1.	Метод постійної сили	Вимірювання рельєфу поверхні при скануванні зразка зондом, який перебуває з ним у безпосередньому контакті, водночас система зворотного зв'язку підтримує постійну силу тиску зонда до поверхні
2.2.	Метод постійної висоти	Вимірювання рельєфу поверхні при скануванні зразка зондом, який перебуває з ним у безпосередньому контакті, водночас система зворотного зв'язку розімкнута і z-координата сканера лишається постійною
3. Переривчасто-контактна скануюча силова мікроскопія		
3.1.	Переривчасто-контактний метод	Вимірювання рельєфу поверхні з використанням коливальної та резонансної частоти зонда
3.3.	Метод відображення фази	Дослідження рельєфу, поверхневої адгезії і в'язко-пружності, що визначають фазову затримку коливань зонда
4. Безконтактна атомно-силова мікроскопія (Non Contact AFM)		
4.1.	Безконтактний метод АСМ	Вимірювання рельєфу поверхні за допомогою коливальної та резонансної частоти зонда. У процесі сканування вістря зонда не торкається поверхні зразка, а зворотний зв'язок підтримує постійну амплітуду коливання зонда

Складено за: [12, 13]

Нині найбільшого поширення у забезпеченні метрологічних робіт в нанометровому діапазоні набули растрова електронна мікроскопія (РЕМ), просвітчаста електронна мікроскопія (ПЕМ), атомно-силова мікроскопія (АСМ), скануюча тунельна мікроскопія (СТМ), мікроскопія на основі сфокусованих

іонних пучків, вторинна іонна мас-спектрометрія, Оже-спектроскопія та ін.

З точки зору дослідження рельєфу і фізичних властивостей структур з високим латеральним розділенням (менше 10 нм), однією з найбільш перспективних є скануюча зондова мікроскопія (СЗМ).

Розмір і структура нанооб'єкта мають великий вплив на тип методики та характеристики методів вимірювання рельєфу нанооб'єктів.

Доведено, що для дослідження рельєфу макроскопічних матеріалів найбільш придатними є оптичні мікроскопи, для наноскопічних матеріалів з розміром частинок, меншим 200 нм, краще використовувати СТМ, АСМ або комбіновані методи скануючої зондової мікроскопії.

У таблиці 2 наведено відносні розміри частинок, що розглядаються як наноскопічні, мезоскопічні та макроскопічні.

Таблиця 2 – Відносні розміри різних класифікацій частинок

Класифікація	Розмір вимірювального об'єкта
Макроскопічний рівень	> 300 нм
Мезоскопічний рівень	Залежить від довжини фазової когерентності
Наноскопічний рівень	0,5-200 нм
Атомний рівень	< 0,5 нм

Складено за: [14, 15]

Методи СЗМ, СТМ, АСМ особливо корисні для визначення топографії структур кристалічних наночастинок [4, 8]. На рисунку 1 зображено атомні структури для деяких типових кристалів добре відомих форм, таких як простий куб, об'ємно-центрований куб та граніцентований куб. Знання розташування атомів у цих структурах допомагає передбачити властивості частинок.

Однак у наноскопічному масштабі саме розмір частинки докорінно змінює фізику її поведінки і диктує необхідність використання інших методів вимірювання.

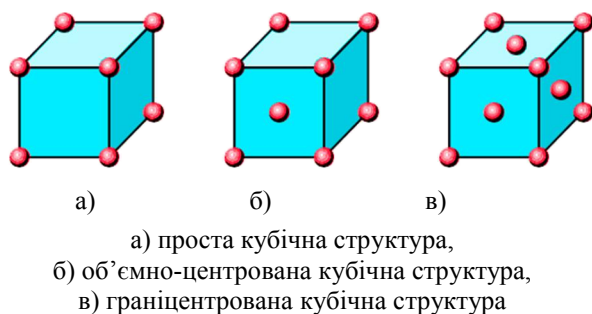


Рисунок 1 – Загальні кристалічні атомні структури

Важливим є той факт, що хімічні й електричні набори властивостей наноматеріалу можуть змінюватися при зменшенні розмірів частинок до нанометрового розміру. Тому на практиці для визначення характеристик рельєфу більшості з цих матеріалів потрібні додаткові хімічні й електричні випробування, що також впливає на вибір методу вимірювання.

Залежно від засобів вимірювання методи аналізу наноматеріалів можна умовно поділити на дві основні групи: дискретні та ансамблеві методи вимірювання.

У дискретних методах, таких як скануюча електронна мікроскопія (СЕМ), просвітчаста електронна мікроскопія (ПЕМ), електронна мікроскопія (ЕМ), атомно-силова мікроскопія (АСМ) та скануюча зондова мікроскопія (СЗМ), зазвичай використовуються потужні мікроскопи. ЕМ та СЗМ є доволі простими методами і відображають форми частинок, але є недостатніми з точки зору статистики та отримання повної характеристики топографії поверхні [1].

На рисунку 2 наведено порівняння дискретних методів нановимірювань щодо показників швидкості отримання результатів і ціни.

Ці методи мають значно більшу роздільну здатність, ніж оптична мікроскопія, і здатні виявляти та вимірювати дискретні частинки шляхом розсіювання пучка електронів високої енергії (СЕМ та ПЕМ) або шляхом детектування через зонд, прикріплений до злегка підресореної консолі (АСМ).

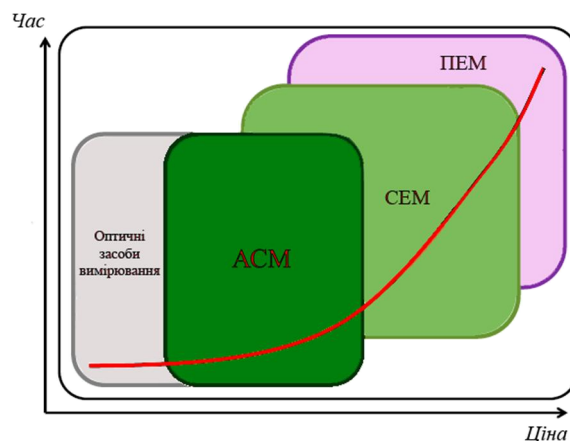


Рисунок 2 – Порівняння дискретних методів нановимірювань

Ансамблеві методи, як правило, є непрямыми методами, коли інформація з багатьох наночастинок отримується одночасно. Методи цієї групи дають змогу встановити середній розмір наночастинок як малокутове розсіювання рентгенівських променів (SAXS) та виявити інтерференцію фотонів.

Доведено, що найбільш поширеним і зручним для користувача методом визначення розміру та рельєфу нанооб'єктів цієї групи є метод динамічного розсіювання світла (ДРС), який ґрунтується на принципах когерентності світлових хвиль, а метрологічні характеристики отримуються шляхом визначення різниці

фаз цих хвиль після взаємодії з наночастинами [2, 16].

Одним із методів, який потенційно поєднує в собі переваги групи дискретних та ансамблевих методів, є метод відстеження наночастинок, який полягає у визначенні положення частинок, зважених у рідині, за допомогою виявлення світла, яке вони розсіюють при опроміненні джерелом лазера, та перегляду суспензії за допомогою камери із зарядженим сполученим пристроєм.

На рисунку 3 зображено співвідношення основних методів дослідження наноматеріалів з різними характеристиками рельєфу нанооб'єктів.

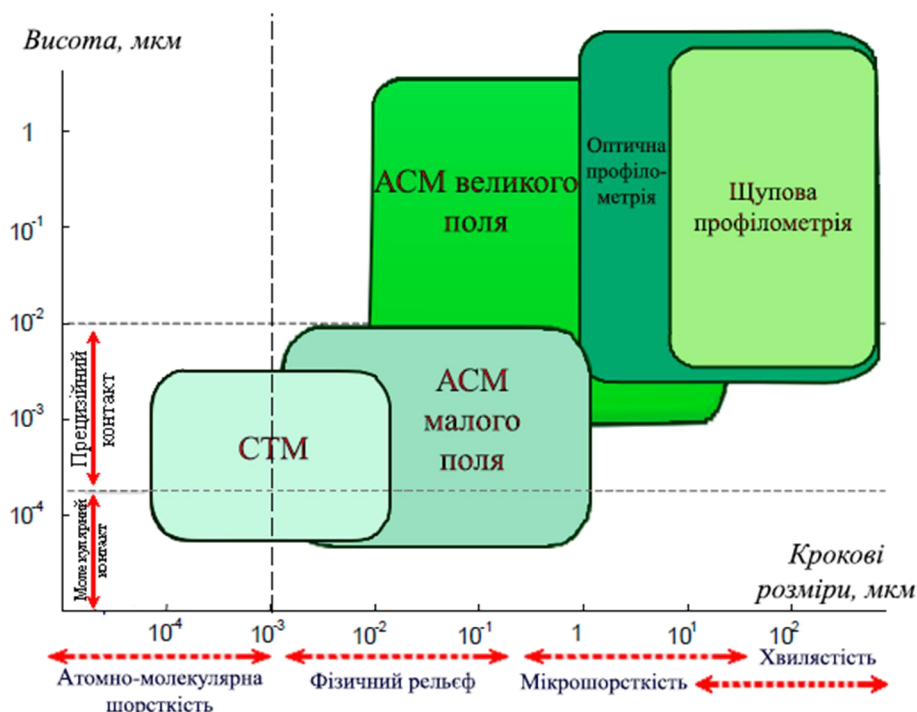


Рисунок 3 – Співвідношення основних методів дослідження наноматеріалів з різними показниками рельєфу нанооб'єктів

На основі проведеного аналізу було визначено, що найбільш функціональними та універсальними у вирішенні досить широкого спектра задач, пов'язаних із визначенням параметрів рельєфу нанооб'єктів, є метод скануючої зондової мікроскопії. СЗМ охоплює низку різноманітних експериментальних методів з вивчення структури і властивостей поверхні як на мікрорівні, так і на рівні окремих молекул та атомів [3, 4].

Безперечною перевагою цього методу є той факт, що за допомогою СЗМ можна отримати вимірювальну інформацію відразу з відносно великої ділянки поверхні, що дає можливість використовувати цей метод в он-лайн-режимі. Тому не дивно, що нині вони широко використовуються для дослідження, діагностики та модифікації поверхонь.

Спільною рисою для всіх методів є наявність загостреного зонда як інструменту

роботи з поверхнею зразків. Існують контактні, напівконтактні і безконтактні режими роботи, а також низка режимів роботи, серед яких: тунельний режим, атомно-силовий режим, режим спектроскопії, метод зонда Кельвіна, режими електросилової, магнітно-силової, ближньопільної, оптичної, конфокальної мікроскопії та ін. [17]. За допомогою цих методів можна вимірювати не

тільки топологію структури, але й безліч спеціальних властивостей, таких як модулі пружності, розподіл різних речовин по поверхні, ступінь шорсткості поверхні, розподіл статичного заряду, орієнтація магнітних доменів тощо [7].

Виходячи з характеру застосувань наявних методів у СЗМ, їх можна класифікувати наступним чином (рисунок 4).

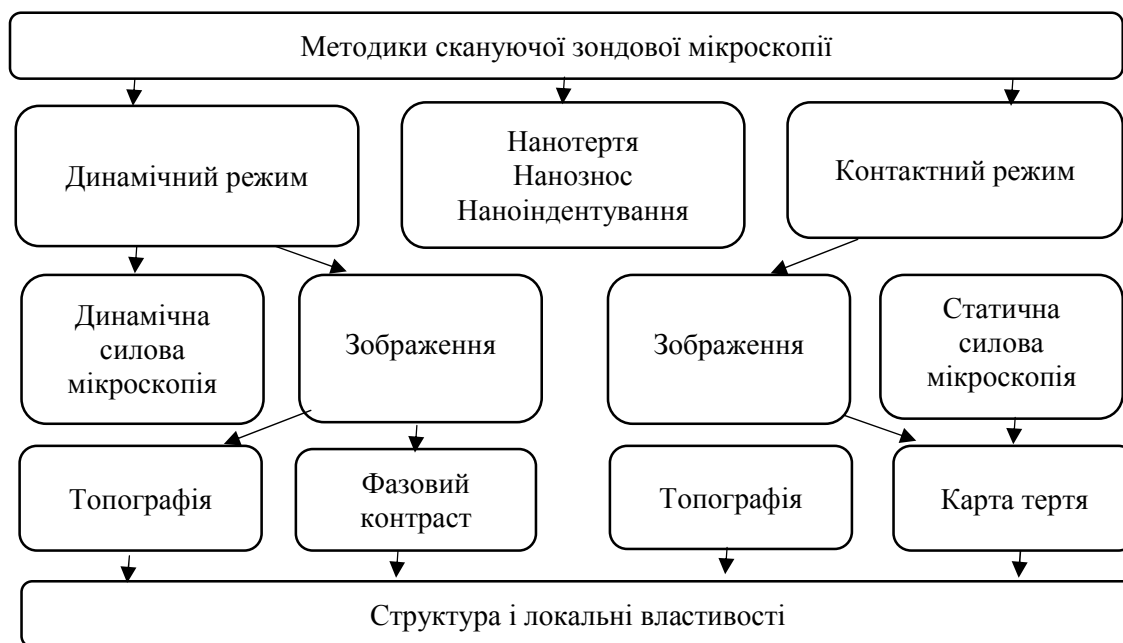


Рисунок 4 – Методи скануючої зондової мікроскопії при пружному і непружному впливі зонда

Незважаючи на різноманіття видів і застосувань сучасних скануючих мікроскопів, в основі їх роботи закладені схожі принципи, а їх конструкції мало різняться між собою.

Ще одною спільною рисою, яка об'єднує не тільки інструменти зондування, а й інші представлені у статті засоби вимірювальної техніки для вимірювання у нанометровому діапазоні, є їх підвищена чутливість до впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів, таких як склад і властивості навколишнього середовища, освітлення, різниця потенціалів і магнітного поля, температурний режим тощо.

Оскільки властивості певних наноматеріалів відмінні від звичайних, вплив дестабілізуючих факторів на результати вимірювання може бути абсолютно непередбачуваним.

Тому при виборі наявного або розробці нового методу вимірювання треба доскональ-

но вивчити особливості кінетики і механізму процесів взаємодії вимірювального наноб'єкта з навколишнім середовищем, визначити властивості наноструктур, параметри процесів і модель їх математичного опису.

Обговорення результатів. Необхідною умовою для вибору умов вимірювання, проведення таких оцінювань і подальшої інтерпретації даних є відтворюваність отриманих результатів і незмінність зразка за комплексом властивостей.

При зміні розмірів можуть змінюватися не тільки значення визначених величин, а й сам характер їх залежностей від властивостей, середовищ і впливів.

Визначено основні напрями створення і використання методів вимірювання мікро- та наносистем:

- створення модельних уявлень зв'язків топологічних характеристик і реакції об'єкта на зовнішні впливи;

- встановлення зв'язків між властивостями елемента або системи і топологією складу, структури, зарядів і полів;

- встановлення зв'язків між технологічними факторами, кінетикою утворення і властивостями наноструктур;

- створення моделей, що пов'язують функціональні параметри пристроїв з властивостями структур, які визначаються при їх виготовленні.

Для спрощення процесу вибору методів нановимірювань розроблено методику виявлення відхилень внаслідок впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів:

$$\omega(t) = \omega_1 e^{\gamma t^a} + \omega_0, \quad (1)$$

де ω_1 – параметр виявлення відхилень нановимірювань у першому підінтервалі часу вимірювання; γ – коефіцієнт, який залежить від кількості вимірювальних операцій; a – коефіцієнт, який залежить від жорсткості впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів; t – час проведення вимірювань; ω_0 – усталене значення параметра інтенсивності виявлення відхилень.

Параметри γ і a кривої, що описується формулою (1), визначаються подвійним логарифмуванням функції $\omega(t)$ для двох підінтервалів часу (на перших етапах проведення вимірювання значенням ω_0 можна знехтувати):

$$\ln \ln \frac{\omega(t_2)}{\omega_1} = -\ln \gamma - \alpha \ln t_2, \quad (2)$$

$$\ln \ln \frac{\omega(t_3)}{\omega_1} = -\ln \gamma - \alpha \ln t_3. \quad (3)$$

Із рівнянь (2) і (3) отримуємо

$$\alpha = \frac{\left(\ln \ln \frac{\omega(t_2)}{\omega_1} - \ln \ln \frac{\omega(t_3)}{\omega_1} \right)}{(\ln t_3 - \ln t_2)},$$

$$\ln \gamma = \left[\frac{\left(\ln \ln \frac{\omega(t_2)}{\omega_1} - \ln \ln \frac{\omega(t_3)}{\omega_1} \right)}{(\ln t_3 - \ln t_2) + \ln \ln \frac{\omega(t_2)}{\omega_1}} \right].$$

Параметр потоку $\omega(t)$ можна представити у наступному вигляді:

$$\omega(t) = \sum_{i=1}^k a_t \omega_{1,i} e^{-\gamma_i t^{a_i}} + \omega_0,$$

де k – кількість груп метрологічних параметрів, де спостерігаються певні відхилення; a_t – ваговий коефіцієнт i -ї групи параметрів.

Представленою залежністю можна описати прояв усіх видів відхилень нановимірювань. Отримані вирази є універсальними для опису потоку виявлених відхилень нанооб'єктів різної конфігурації. Відмінні умови проведення вимірювання визначатимуться тільки за рахунок значень коефіцієнтів γ і a .

Стандартне відхилення випадкової величини при визначенні топології поверхні нанооб'єкта можна розрахувати на основі першого центрального моменту

$$\sigma_1 = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{ij} (Z_{ij} - \bar{Z})^2},$$

де Z_{ij} – значення висоти рельєфу в точці з координатами i та j , $\bar{Z}$ – середнє значення висоти рельєфу по кадру СЗМ.

За допомогою другого центрального моменту розраховується двовимірне середньоквадратичне відхилення висот рельєфу, а саме:

$$\sigma_2 = \left[\left(\frac{1}{N} \right)^2 \sum_{ij} (Z_{ij} - \bar{Z})^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Представлені розрахунки дають змогу враховувати впливи зовнішніх дестабілізуючих факторів на нанооб'єкт та гарантувати можливість корекції спричинених ними відхилень.

Висновки. Існує багато переваг та недоліків у виборі конкретного методу. Очевидно, що найкращої загальної методики не існує. На шляху до створення оптимальної методики вимірювання параметрів рельєфу нанооб'єктів існує ряд задач, які потребують вирішення. Серед основних із них є наступні:

– робота з нанооб'єктами і наноструктурами пов'язана з наднизькими рівнями сигналу, тому необхідно звести до мінімуму шум та інші джерела похибок, які можуть перешкодити сигналу;

– властивості певних наноматеріалів відмінні від звичайних, через це методи вимірювання мають враховувати специфічні особливості наноматеріалів;

– набори властивостей наноматеріалу є хімічними й електричними, тому при розробці методів вимірювання рельєфу нанооб'єктів треба враховувати розмір і структуру нанооб'єкта;

– метрологічні засоби нановимірювань мають бути простими у використанні й економічними.

Доведено, що для визначення розміру, геометричної форми та рельєфу нанооб'єктів найбільш оптимальним методом є зондова скануюча мікроскопія. Безперечною перевагою цього методу є той факт, що за допомогою СЗМ можна отримати вимірювальну інформацію відразу з відносно великої ділянки поверхні, що дає змогу використовувати цей метод в онлайн-режимі.

Рекомендовано для вимірювання рельєфу нанооб'єктів проводити інтеграцію інформації, наданої різними методами, але результати різних методів можуть бути суперечливими в деяких випадках, як зазначено нижче:

1. Кожний метод ґрунтується на необхідності дослідження різних властивостей нанооб'єктів.

2. Етапи підготовки зразка можуть модифікувати результати шляхом подальших ненавмисних рухів частинок у матриці, змінюючи середній діаметр, виявлений СЗМ.

3. Невизначеність, яка не враховується, також може вплинути на остаточні вимірювання.

4. При визначенні середнього діаметра розподілу за розміром застосовується різне зважування. Порівняння результатів різних вимірювань однієї і тієї ж методології буде в цьому сенсі менш проблематичним, оскільки наявна похибка є постійною. Тому для перевірки методу похибка має бути точно виміряна, а результати повинні узгоджуватися з іншими методами.

З урахуванням цих вимог, збільшення кількості використовуваних методів вимірювання нанооб'єктів підвищить надійність і точність результатів вимірювання а кожний метод надаватиме додаткову інформацію. Основною умовою для правильного порівняння результату є знання конкретних параметрів, на яких базується кожний застосований метод.

Список використаних джерел

- [1] Э. М. Бромберг, и К. Л. Куликовский, *Тестовые методики повышения точности измерений*. Москва: Энергия, 2008.
- [2] С. А. Кононогов, "Исследование измерительных и калибровочных возможностей средств измерений нанометрового диапазона", *Законодательная и прикладная метрология*, № 3, с. 19-25, 2008.
- [3] П. А. Тодуа, "Метрология и стандартизация в нанотехнологиях и nanoиндустрии", *Измерительная техника*, № 5, с. 5-7, 2008.
- [4] The Scanning Probe Image Processor (SPIP) [Online]. Available: www.imagemet.com.
- [5] L. Garnaes, "Two-dimensional nanometer scale calibration based on one-dimensional gratings", *Appl. Phys.*, A 66, pp. 831-835, 1998.
- [6] Nanosurf. "Atomic force microscopy applications". [Online]. Available: <http://www.nanosurf.com/en/>.
- [7] "Equipment for real-time industrial applications". [Online]. Available: <http://www.digital-instruments.com/>.
- [8] W. Fritzsche, L. Takac, and E. Henderson, "Application of atomic force microscopy to visualization of DNA, chromatin, and chromosomes", *Critical Reviews in Eukaryotic Gene Expression*, vol. 7, pp. 231-240, 1997.
- [9] S. Roth, L. Dellmann, G. A. Racine, and N. F. de Rooij, "High aspect ratio UV photolithography for electroplated structures", *J. Micromech. Microeng.*, vol. 9, pp. 105-108, 1999.
- [10] AZOnano. [Online]. Available: <http://www.azonano.com/>.
- [11] R. A. Said, "Microfabrication by localized electrochemical deposition: experimental investigation and theoretical modeling", *Nanotechnology*, vol. 15, p. 867, 2004.
- [12] H. Iwasaki, T. Yoshinobu, and K. Sudoh, "Nanolithography on SiO₂/Si with a scanning tunneling microscope", *Nanotechnology*, vol. 14, pp. 55-62, 2003.

- [13] A. Majumdar, P. I. Oden, J. P. Carrejo, L. A. Nagahara, J. J. Graham, and J. Alexander, "Nanometer-scale lithography using the atomic force microscope", *Appl. Phys. Letters*, vol. 61, pp. 2293-2295, 1992.
- [14] C. K. Hyon et al., "Application of atomic-force-microscope direct patterning to selective positioning of InAs quantum dots on GaAs", *Appl. Phys. Letters*, vol. 77, pp. 2607-2609, 2000.
- [15] M. Falvo et al., "The nanomanipulator: A teleoperator for manipulating materials at the nanometer scale", in *Proc. Int. Symp. On Science and Technology of Atomically Engineered Materials*, 1996, pp. 579-586.
- [16] M. Sitti, and H. Hashimoto, "Tele-nanorobotics using atomic force microscope as a robot and sensor", *Advanced Robotics Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 417-436, 1999.
- [17] M. Sitti, and H. Hashimoto, "Two-dimensional fine particle positioning under optical microscope using a piezoresistive cantilever as a manipulator", *Journal of Micro-mechatronics*, vol. 1, no. 1, pp. 25-48, 2000.
- [7] "Equipment for real-time industrial applications". [Online]. Available: <http://www.digital-instruments.com/>.
- [8] W. Fritzsche, L. Takac, and E. Henderson, "Application of atomic force microscopy to visualization of DNA, chromatin, and chromosomes", *Critical Reviews in Eukaryotic Gene Expression*, vol. 7, pp. 231-240, 1997.
- [9] S. Roth, L. Dellmann, G. A. Racine, and N. F. de Rooij, "High aspect ratio UV photolithography for electroplated structures", *J. Micromech. Microeng.*, vol. 9, pp. 105-108, 1999.
- [10] AZOnano. [Online]. Available: <http://www.azonano.com/>.
- [11] R. A. Said, "Microfabrication by localized electrochemical deposition: experimental investigation and theoretical modeling", *Nanotechnology*, vol. 15, p. 867, 2004.
- [12] H. Iwasaki, T. Yoshinobu, and K. Sudoh, "Nanolithography on SiO₂/Si with a scanning tunneling microscope", *Nanotechnology*, vol. 14, pp. 55-62, 2003.
- [13] A. Majumdar, P. I. Oden, J. P. Carrejo, L. A. Nagahara, J. J. Graham, and J. Alexander, "Nanometer-scale lithography using the atomic force microscope", *Appl. Phys. Letters*, vol. 61, pp. 2293-2295, 1992.
- [14] C. K. Hyon et al., "Application of atomic-force-microscope direct patterning to selective positioning of InAs quantum dots on GaAs", *Appl. Phys. Letters*, vol. 77, pp. 2607-2609, 2000.
- [15] M. Falvo et al., "The nanomanipulator: A teleoperator for manipulating materials at the nanometer scale", in *Proc. Int. Symp. On Science and Technology of Atomically Engineered Materials*, 1996, pp. 579-586.
- [16] M. Sitti, and H. Hashimoto, "Tele-nanorobotics using atomic force microscope as a robot and sensor", *Advanced Robotics Journal*, vol. 13, no. 4, pp. 417-436, 1999.
- [17] M. Sitti, and H. Hashimoto, "Two-dimensional fine particle positioning under optical microscope using a piezoresistive cantilever as a manipulator", *Journal of Micro-mechatronics*, vol. 1, no. 1, pp. 25-48, 2000.

References

- [1] E. M. Bromberg, and K. L. Kulikovskiy, *Test methods for improving measurement accuracy*. Moscow: Energiya, 2008. [in Russian].
- [2] S. A. Kononogov, "Investigation of measuring and calibration capabilities of measuring instruments of the nanometer range", *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya*, no. 3, pp. 19-25, 2008. [in Russian].
- [3] P. A. Todua, "Metrology and standardization in nanotechnology and nanoindustry", *Izmeritel'naya tekhnika*, no. 5, pp. 5-7, 2008. [in Russian].
- [4] The Scanning Probe Image Processor (SPIP) [Online]. Available: www.imagemet.com.
- [5] L. Garnaes, "Two-dimensional nanometer scale calibration based on one-dimensional gratings", *Appl. Phys.*, A 66, pp. 831-835, 1998.
- [6] Nanosurf. "Atomic force microscopy applications". [Online]. Available: <http://www.nanosurf.com/en/>.

V. P. Kvasnikov, *D.Tech.Sc., professor,*
M. O. Kataieva, *Ph.D.*

e-mail: kataeva.mariia@gmail.com

National Aviation University

Liubomyr Huzar ave., 1, Kyiv, 03058, Ukraine

ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF METROLOGICAL SUPPORT OF MEASUREMENTS OF NANOOBJECTS RELIEF

The article analyzes the existing methods and means of measuring objects in the nanometer range and develops their classification based on the main principles of use. The main parameters on which each described method is based are considered and the conditions for their most effective application are determined. It is proved that chemical and electrical sets of properties of the nanomaterial can change when the particle size decreases to the nanometer size, which requires the inclusion of additional chemical and electrical tests in existing methods. Based on the analysis, it has been determined that the method of scanning probe microscopy is the most functional and universal in solving a wide range of problems. The classification of existing methods of scanning probe microscopy based on the nature of their applications is developed. The main directions of creation and use of methods of measurement of micro- and nanosystems are determined, namely: creation of model representations of connections of topological characteristics and reaction of object to external influences, establishment of communications between properties of an element or system, research of structure, charges and fields, establishing links between technological factors, the kinetics of formation and the properties of nanostructures, creation of models that link functional parameters of devices with the properties of structures.

It is proved that in order to obtain more reliable results, the method of nanomeasurements should take into account the effects of external destabilizing factors on the nanoobject and ensure the possibility of correcting the deviations caused by them. To simplify the process of choosing nanomeasurement methods, a method for detecting deviations due to the influence of external destabilizing factors has been developed. Universal expressions for the description of a stream of the revealed deviations of nanoobjects of various configuration are received. It is recommended to use techniques based on the principle of integration of information provided by different methods to increase the accuracy of nano-measurements. It is proved that increasing the number of measurement methods used in the metrological analysis of nanoobjects will increase the reliability and accuracy of measurement results and each method will provide additional information.

Keywords: nanotechnology, nanomeasurement, metrological support, methods and means of measurement, nanomaterials.

УДК 004.82:322(075):621

[0000-0003-1506-9759] **В. С. Моркун**, д.т.н., професор,[0000-0003-2445-6259] **І. А. Котов**, к.т.н., доцент,Криворізький національний університет
вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, Україна, 50027
e-mail: rioexito@gmail.com

КРИТЕРІЇ ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ БАЗИ ПРОФЕСІЙНИХ КОНЦЕПТІВ КОМПЛЕКСУ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Статтю присвячено проблемі розробки критеріїв оперативного моніторингу й оцінювання ефективності інтелектуальної системи підтримки рішень для протиаварійного керування режимами енергосистем на основі використання професійних концептів і спеціалізованих тезаурусів. Запропоновано критерії розрахунку оперативності використання професійних концептів тезауруса знань про автоматизацію ліквідації аварій в енергосистемі.

Наукова новизна полягає в розробці та застосуванні коефіцієнтів ефективності тезауруса професійної лексики, що ґрунтуються на поданні професійних концептів знань про ліквідацію аварій в енергосистемі. Отримані показники дають можливість оцінювати ступінь професійності й ефективності лінгвістичного корпусу і будувати продуктивні бази знань. На відміну від існуючих підходів до побудови баз знань, запропонований підхід дає змогу уніфікувати проектування систем підтримки прийняття рішень та скоротити час їх реалізації.

Практичне значення одержаних результатів полягає в оцінюванні ефективності використання професійних знань для побудови уніфікованих інтелектуальних систем підтримки рішень в галузі протиаварійного керування енергосистемами. Результати роботи полягають у забезпеченні оперативного моніторингу ефективності використання бази знань професійних концептів термінів і сленгу. Запропонована модель оцінювання ефективності професійного тезауруса базується на відношенні інтенсивностей зростання загального та спеціалізованого професійного тезаурусів.

Результати досліджень доводять зростання ефективності професійних тезаурусів при переході до більш специфічних спеціалізованих науково-технічних галузей.

Ключові слова: диспетчерське керування, онтологія, тезаурус, колокація, семантика, аббревіатура.

Вступ. При розгляді аварійних ситуацій у складних промислових системах необхідно завжди враховувати так званий «людський фактор», який відіграє значну роль у виникненні та формуванні збитків. Керуючий персонал відчуває великий психофізіологічний тиск і не завжди може адекватно реагувати на аварійну ситуацію [1-3].

Сучасна енергосистема (ЕС) є великим комплексним ієрархічним об'єктом керування, що характеризується одночасністю процесів вироблення, розподілу і споживання енергії. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває комп'ютерна інтелектуальна підтримка прийняття рішень оперативного диспетчерського персоналу (ОДП). Системи підтримки прийняття рішень (СППР) інтегруються в оперативні інформаційно-керуючі комплекси (ОІКК) автоматизованої системи диспетчерського керування (АСДК) енергосистеми – SCADA [4].

Продуктивність СППР значною мірою обумовлена ефективністю використання професійного тезауруса. Тому є актуальною проблема дослідження і розробки критеріїв оперативного моніторингу ефективності використання бази концептів професійної лексики в СППР для протиаварійного керування режимами енергосистем. З огляду на специфіку професійної галузі, як одну з форм подання знань було обрано форму фактуальних колокацій, а як джерело професійної лексики – лінгвістичний корпус ліквідації аварій та запобігання їм в енергосистемі [5].

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Багато вітчизняних і зарубіжних вчених накопили значний досвід в галузі розробки теоретичних моделей і практичної реалізації форм подання баз знань (БЗ). Відзначимо деяких із них: Башликов А. А., Вагін В. М., Венделін А. Г., Геловані В. А., Евланова Л. Г., Кретов В. С., Ларічев О. І., Лю-

барський Ю. Я., Лорьер Ж. Л., Люггер Дж. Ф., Поспелов Д. А., Самойлов В. Д., Таунсенд К., Терелянський П. В., Ульман Дж., Уотермен Д., Фішберн П. К., Форсайт Ф., Чаплинський Ю. П.

В галузі інтелектуалізації управління режимами ЕС варто зазначити роботи Баркалова С. А., Баркан Я. Д., Бартоломея П. І., Башликова А. А., Бердникова Р. Н., Буткевича А. Ф., Глазунової А. М., Гришанова С. О., Любарського Ю. Я., Місріханова М. Ш., Панащєцького Д. А., Поспелова Г. Є., Чебана В. М. та інших [6-12].

Однією з головних задач при побудові та впровадженні СППР є розробка адаптивної моделі подання професійної лексики [13, 14]. Як уніфікована модель подання професійних знань може служити апарат онтологій [15]. Платформою побудови онтологій є професійний тезаурус.

Згідно з [16-18] оцінювання оперативної ефективності проводиться на основі декількох підходів. Їх можна розділити на дві групи: 1) група методів оцінювання економічної ефективності і 2) група методів оцінювання оперативної (технічної) ефективності [19].

На основі аналізу можна зробити висновок про відсутність єдиних уніфікованих рішень в галузі подання професійних знань і оцінювання ефективності баз професійних тезаурусів концептів. Проведений аналіз досліджень і публікацій підтверджує актуальність проблеми розробки критеріїв оперативного моніторингу бази професійних концептів.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є розробка критеріїв оперативного моніторингу використання бази професійних концептів комплексу автоматизації керування енергосистеми. На основі розроблених критеріїв можна показати, що використання специфічних професійних тезаурусів є ефективним для скорочення обсягів БЗ і підвищення швидкості роботи СППР.

Відповідно до мети дослідження поставлено такі завдання:

- розробити формально-логічну модель онтології фактуальних колокацій;
- побудувати БЗ на основі підмножини лінгвістичного корпусу ліквідації аварій та запобігання їм в енергосистемі;
- побудувати загальний тезаурус професійної лексики;
- побудувати спеціалізований тезаурус професійних термінів і сленгу;

– провести статистичну обробку вихідної лексичної вибірки та професійних тезаурусів;

– розробити критерії оперативного моніторингу застосування тезауруса фактуальних колокацій професійного лінгвістичного корпусу ліквідації аварій в енергосистемі;

– показати практичну цінність і значимість розроблених моделей і критеріїв оцінювання ефективності бази професійних концептів.

Постановка розрахункових експериментів та отримання результатів дослідження. Узагальнюючи висновки з [18], приймемо, що під оперативною ефективністю інтелектуальної системи можна розуміти ефективність обробки структур знань в БЗ, різноманітність методів, спрощення та скорочення часу процедур доступу до знань, що, в кінцевому підсумку, забезпечує підвищення гнучкості і швидкості обробки знань. Таким чином, оперативна ефективність обумовлюється двома факторами – ефективністю подання БЗ і ефективністю обробки структур знань у БЗ. Причому, основним фактором, що впливає на загальну оперативну ефективність СППР, є оперативна ефективність подання БЗ. З цієї точки зору, зробимо оцінювання оперативної ефективності БЗ, побудованої на інкорпорації професійних онтологій.

Багаторівнева інкорпорація форм знань, представлених на базі єдиного підходу еволюції тезаурусів, забезпечує високу оперативну ефективність використання БЗ. Головним фактором є єдиний механізм обробки знань усіх онтологічних рівнів.

Тому розглянемо задачу оцінювання ефективності тезауруса концептів і тезауруса фактуальних колокацій професійного лінгвістичного корпусу ліквідації аварій в енергосистемі. При розгляді вищих рівнів ієрархії БЗ оперативний ефект використання розробленої еволюції онтологій буде тільки наростати. Для вирішення цього завдання можна застосувати розроблені математичні моделі професійного тезауруса фактуальних колокацій. Розробимо критерії оцінювання його ефективності в рамках моделі онтології. На основі розроблених критеріїв можна показати, що використання специфічних професійних тезаурусів є ефективним для скорочення обсягів БЗ і підвищення швидкості роботи СППР.

Як правило колокації структури елементарного факту приймемо, що елементарний

факт – це триплет атомарних висловлювань (лексем спеціалізованого тезауруса), що розглядається як ізольований орграф. При інтерпретації фактів кожен із елементів триплета розглядається як одна лінгвістична константа або значення лінгвістичної змінної. Як основу для репрезентації фактів використовують формальні моделі атомарних висловлювань, які утворюють активний тезаурус і не мають зв'язків між собою. Для колокації фактів утворюються трійки пов'язаних атомарних висловлювань як атомарних лексем триплетів фактів.

Специфіка професійної галузі – управління режимами енергосистем – полягає в глибокій структурованості та ієрархічності лінгвістичних блоків і концептів. Як вихідний експертний лінгвістичний корпус використовуємо інструктивний диспетчерський матеріал: «12. Дії оперативного персоналу при втраті власних потреб на ПС» [20]. У зазначеній професійній галузі зробимо вибірку елементарних концептів. Введемо множини висловлювань, які умовно відносяться до одного контексту c_0 . Короткий фрагментарний приклад тезауруса наведено нижче: $S_1^{c_0}$ = «відключення»; $S_2^{c_0}$ = «робочий трансформатор»; $S_3^{c_0}$ = «власні потреби»; $S_4^{c_0}$ = «відновлення напруги»; $S_5^{c_0}$ = «секція»; $S_6^{c_0}$ = «в результаті дії АВР»; $S_7^{c_0}$ = «0,4 кВ»; $S_8^{c_0}$ = «черговий персонал»; $S_9^{c_0}$ = «включити резервний трансформатор»; $S_{10}^{c_0}$ = «подати напругу»; $S_{11}^{c_0}$ = «вступний автомат»; $S_{12}^{c_0}$ = «секційний вимикач»; $S_{13}^{c_0}$ = «відновлення напруги»; $S_{14}^{c_0}$ = «по блінкеру визначити»; $S_{15}^{c_0}$ = «відключився трансформатор»; $S_{16}^{c_0}$ = «вимірювання опору ізоляції».

Подібним чином побудована структурно-лінгвістична модель уніфікованої професійної онтології елементарних фактів. Факти формувалися на основі усталених лінгвістичних форм професійної галузі. На основі отриманих колокацій побудований загальний тезаурус лексичного корпусу.

В свою чергу, на основі загального тезауруса виділено тезаурус спеціальних професійних термінів і сленгу. Обсяг цього фрагмента фактуальної бази знань – 63 факти.

На основі фактичних даних наведемо графічну інтерпретацію вибірки концептів тезауруса по наростаючій, яка показана на рисунку 1.

З рисунка 1 видно, що зростання обсягу лексем фактуальної БЗ значно випереджає зростання тезауруса. Цей ефект значною мі-

рою обумовлений професійною специфікою проблемної галузі та масовим використанням у текстах специфічного сталого сленгу.



Рисунок 1 – Динаміка вибірки лексем і тезауруса БЗ по наростаючій

При побудові автоматизованих систем обробки професійних текстів і в БЗ інтелектуальних систем більший інтерес становлять виміри вибірки в деяких кодах, символах чи байтах. На рисунку 2 показано результати абсолютної вибірки в символах (буквах) по наростаючій фактів БЗ загального і спеціального професійного тезаурусів.



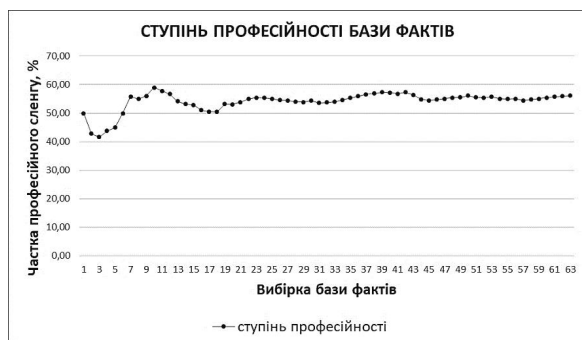
Рисунок 2 – Динаміка абсолютної вибірки БЗ і тезаурусів по наростаючій

Рисунок 2 свідчить, що специфічний професійний тезаурус сленгу й аббревіатур має ще меншу інтенсивність зростання, що свідчить про його підвищену ефективність та необхідність використання. Виходячи з отриманих даних, в роботі було запропоновано показник оцінювання ступеня професійності БЗ (D_p)

$$D_p = \frac{N_{FWTA}^+}{N_{FW}^+} 100\%, \quad (1)$$

де N_{FWTA}^+ – кількість лексем сленгу й аббревіатур по наростаючій, слів; N_{FW}^+ – загальна кількість лексем по наростаючій, слів.

Особливістю цього показника є врахування структури фактів і специфіки семантичного навантаження кожного з трьох концептів факту. На рисунку 3 показано динаміку зміни показника ступеня професійності БЗ.



Рисунку 3 – Показник ступеня професійності БЗ по наростаючій

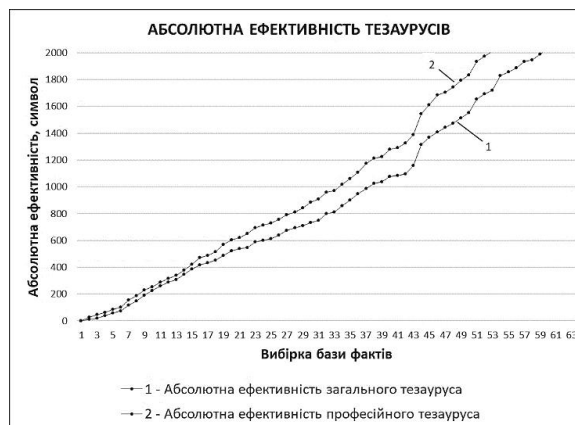
Як видно, показник D_p швидко стабілізується щодо середнього значення. Показник характеризує вміст у структурованих формах представлення знань специфічної професійної лексики і сленгу. Інтерпретація графіка на рисунку 3 полягає в тому, що у специфічній лексиці інструктивних матеріалів по ліквідації аварій і запобіганню їм в енергосистемах, структурованій у формі фактів, відсоток специфічного сленгу й аббревіатур становить понад 55 %.

У роботі пропонується кілька варіантів показників ефективності тезаурусів. Перший показник оцінює абсолютну ефективність, виражену кількісно в символах (або байтах), як надмірність, ліквідовану використанням загального (E_{FT}^{abs}) або спеціального (E_{FTA}^{abs}) тезаурусів

$$\begin{aligned} E_{FT}^{abs} &= \Delta V_{F-FT} = V_F^+ - V_{FT}^+, \\ E_{FTA}^{abs} &= \Delta V_{F-FTA} = V_F^+ - V_{FTA}^+, \end{aligned} \quad (2)$$

де V_F^+ – обсяг фактів по наростаючій, символ; V_{FT}^+ – обсяг загального тезауруса фактів по наростаючій, символ; V_{FTA}^+ – обсяг тезауруса сленгу й аббревіатур по наростаючій, символ.

Абсолютні величини ефективності тезаурусів показують стійке зростання надмірності лінгвістичного корпусу по відношенню до словників. Ілюстрація абсолютної ефективності тезаурусів наведена на рисунку 4.



Рисунку 4 – Динаміка зростання абсолютної ефективності тезаурусів

Однак тезауруси також зростають в обсягах. Тому становить інтерес відношення абсолютної ефективності до обсягу бази фактів по наростаючій. З цією метою в роботі запропоновано другий показник ефективності тезаурусів – показник відносної ефективності загального (E_{FT}^{rel}) або спеціального (E_{FTA}^{rel}) тезаурусів

$$\begin{aligned} E_{FT}^{rel} &= \frac{E_{FT}^{abs}}{V_F^+} 100\% = \frac{V_F^+ - V_{FT}^+}{V_F^+} 100\%, \\ E_{FTA}^{rel} &= \frac{E_{FTA}^{abs}}{V_F^+} 100\% = \frac{V_F^+ - V_{FTA}^+}{V_F^+} 100\%. \end{aligned} \quad (3)$$

Всі компоненти формул (3) аналогічні компонентам формул (2).

Ілюстрація динаміки відносної ефективності тезаурусів наведена на рисунку 5.



Рисунку 5 – Динаміка зростання відносної ефективності тезаурусів

Як видно, графіки мають дві явно виражені зони – зону відносного випереджаючого накопичення тезаурусів і зону відносного про-

порційного зростання тезаурусів. Причому, ефективність спеціального тезауруса аббревіатур і сленгу вища ефективності загального тезауруса. Зона відносного випереджаючого накопичення тезаурусів характеризується накопиченням бази фактів в єдиному термінологічному і семантичному блоці, коли тезаурус формується швидко і практично не зростає. Зона відносного пропорційного зростання тезаурусів характерна для збільшення обсягу лінгвістичного корпусу, коли накопичуються нові термінологічні та семантичні блоки. При цьому тезаурус знову починає зростати в обсязі.

Показники відносної ефективності професійних тезаурусів є інформативними і адекватно відображають семантичний і кількісний характер бази фактів лінгвістичного корпусу ліквідації аварій в енергосистемі. Однак ці показники змінюються при накопиченні БЗ і при об'єднанні кількох специфічних галузей. Тому виникає необхідність у стійкому інтегральному показнику ефективності тезаурусів. З цією метою в роботі запропоновано третій показник – інтегральний коефіцієнт ефективності тезаурусів. Його розрахунок ґрунтується на апроксимації показників абсолютної ефективності тезаурусів.

Графічні результати апроксимації і пояснення до розрахунків наведені на рисунку 6.



Рисунок 6 – Розрахунок інтегральних коефіцієнтів ефективності тезаурусів

Фізичний сенс інтегрального коефіцієнта ефективності тезауруса полягає у відношенні кута нахилу апроксимуючої прямої швидкості зростання тезауруса до кута нахилу апроксимуючої прямої швидкості зростання вихідної бази. Оскільки обсяги вибірки дані по осях в однакових одиницях і масштабах, то кути нахилів апроксимуючих прямих будуть стабілізуватися.

Вирази для розрахунків інтегральних коефіцієнтів ефективності тезауруса, відповідно, загальної та професійної аббревіатур і сленгу наведені у вигляді наступних формул:

$$K_{ET} = \left(1 - \frac{\alpha_T}{\alpha_B}\right) 100\% = \left(1 - \frac{\arctg(a_T)}{\arctg(a_B)}\right) 100\%, \quad (4)$$

$$K_{ETA} = \left(1 - \frac{\alpha_{TA}}{\alpha_B}\right) 100\% = \left(1 - \frac{\arctg(a_{TA})}{\arctg(a_B)}\right) 100\%, \quad (5)$$

де K_{ET} – коефіцієнт ефективності загального тезауруса; K_{ETA} – коефіцієнт ефективності тезауруса аббревіатур і сленгу; α_T – кут нахилу апроксимуючої прямої для загального тезауруса; α_{TA} – кут нахилу апроксимуючої прямої для тезауруса аббревіатур і сленгу; α_B – кут нахилу апроксимуючої прямої для бази фактів; a_T – коефіцієнт при V_{KB} у рівнянні прямої для загального тезауруса; a_{TA} – коефіцієнт при V_{KB} у рівнянні прямої для тезауруса аббревіатур і сленгу; a_B – коефіцієнт при V_{KB} у рівнянні прямої для бази фактів.

Підстановка розрахункових значень дає наступні результати:

$$K_{ET} = \left(1 - \frac{\arctg(0.2751)}{\arctg(a_1)}\right) 100\% = 65.82\%,$$

$$K_{ETA} = \left(1 - \frac{\arctg(0.1439)}{\arctg(1)}\right) 100\% = 81.81\%,$$

Таким чином, ефективність загального тезауруса становить 65,82 %, а ефективність тезауруса аббревіатур і сленгу – 81,81 %. Отже, оперативна ефективність використання бази знань, побудованої на інкорпорації професійних онтологій, буде тим вищою, чим більш спеціалізованою буде професійна галузь СППР. Професійна галузь протиаварійного керування режимами енергосистем є вузько-спеціалізованою і тому побудова для неї спеціалізованих тезаурусів є доцільною.

Оцінимо практичний вплив підвищення оперативної ефективності багаторівневої онтологічної БЗ на ефективність роботи ОДП. Для цієї мети проведено програмну апробацію методики на фактичних даних оперативного управління нештатною ситуацією електричної мережі енергосистеми. Використано інструктивні і практичні дані диспетчерських тренувань. Розглянуто аварійне управління перетіканням потужності в перетині Південноукраїнська АЕС – Вінниця. Напрямок перетікання – на Захід. В рамках єдиної БЗ побудовано онтології концептів, фактів, продукцій.

Програмний комплекс контролює перетікання по перетину для поточного стану схеми мережі. При виході значення за нормовані межі система генерує величини керуючих

впливів на основі матриць чутливості. Потім використовуються продукції з бази правил для формування рад диспетчеру у напрямку дій, ступеня регулювання режиму або зміни схеми енергосистеми.

Отримане технічне рішення застосоване до тестових протиаварійних тренувань (ПАТ) диспетчерського персоналу. Як об'єкт управління використано розрахункові режимні моделі електричної мережі ОЕС України. Було оброблено результати тренування двох однакових груп диспетчерського персоналу з однаковими кваліфікацією та досвідом роботи: 1-а група (зміна – 2 людини) без використання СППР; 2-а група (зміна – 2 людини) з використанням СППР в оперативному режимі.

Згідно з протоколом тренувань оцінювання дій диспетчерів здійснювалося групою експертів за 5-бальною системою відповідно до методики, запропонованої в [21].

Вихідні умови тренування:

- контрольований об'єкт – перетин ПУАЕС – Вінниця. Перетин включає такі лінії: ПЛ-750 кВ ПУАЕС – Вінниця, ВЛ-330 кВ Конотоп – Ніжин, ВЛ-330 кВ КремГЕС – Черкаси, ВЛ-330 кВ ПУАЕС – Побужжя, ВЛ-330 кВ Трихати – Аджалик, ВЛ-330 кВ Гомель – Чернігів, ВЛ-330 кВ Мозир – ЧАЕС;
- схема роботи мережі – нормальна;
- режим роботи з ОЕС країн Східної Європи – паралельний;
- величина перетікання по ВЛ 750 кВ ПУАЕС – Вінниця – 1300 МВт;
- допустиме перетікання в перерізі для заданих умов – 3600 МВт;
- зафіксоване перетікання по міжсистемному транзиту (перетину) – 3640 МВт;
- зафіксоване перевищення міжсистемного перетікання – 40 МВт;
- зафіксована часткова відмова в роботі або недостатня ефективність дії протиаварійної автоматики (ПА);
- відбулося порушення синхронної роботи ОЕС України і ОЕС країн Східної Європи.

Завдання тренування – згідно з інструкцією ліквідувати перевищення міжсистемного перетікання протягом 1-2 хв. В іншому випадку диспетчер енергосистеми зобов'язаний розділити несинхронно працюючі частини енергосистеми.

Стратегія тренування – виконати завдання і зробити формування наступних оцінних параметрів діяльності диспетчерів [21, 22]: q_1 – правильно, своєчасно виконані

дії; q_2 – невиконані дії; q_3 – неправильні дії; q_4 – дії, виконані з запізненням; q_5 – дії, виконані раніше необхідного; q_6 – зайві дії; q_7 – неоптимальні дії.

В ході тренування на основі бази знань і матриць чутливості СППР визначила необхідні регулюючі дії:

- загальний регулюючий вплив – 12,5 МВт;
- регулюючий вплив Дністровської ГЕС – 11,36 МВт;
- регулюючий вплив Канівської ГЕС – 1,14 МВт.

Після проведення незалежних протиаварійних тренувань (без використання СППР і з використанням СППР) і отримання параметрів $q_1 - q_7$ були обчислені такі експертні професійно-психологічні характеристики диспетчерських змін: α – професіоналізм; ρ – надійність роботи; β – рівень підготовки; γ – психологічна стійкість у роботі; δ – оперативність і чіткість у роботі; λ – інтенсивність закономірних відмов диспетчерських змін; Y – оцінювання умовних збитків від недовідпуску електроенергії та зниження її якості.

Професійні та психологічні характеристики ОДП, що обчислюються на основі протоколу дій учасника тренувань:

професіоналізм –

$$\alpha = \frac{q_1}{\sum_{i=1}^7 q_i}; \quad (6)$$

надійність роботи –

$$\rho = 1 - \frac{\sum_{i=2}^7 q_i}{\sum_{i=1}^7 q_i}; \quad (7)$$

рівень підготовки –

$$\beta = 1 - \frac{\sum_{i=3}^4 q_i}{\sum_{i=1}^7 q_i}; \quad (8)$$

психологічна стійкість у роботі –

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_{i=5}^6 q_i}{\sum_{i=1}^7 q_i}; \quad (9)$$

оперативність і чіткість у роботі –

$$\delta = \frac{q_4 + q_7}{\sum_{i=1}^7 q_i} \quad (10)$$

Результати проведених тренувань наведено в таблиці 1. Як видно з таблиці, використання інтелектуальних засобів системи підтримки рішень позитивно і цілком визначено впливає на результати тестових протиаварійних тренувань ОДП. Показники професіоналізму, надійності, рівня підготовки, психологічної стійкості, чіткості в роботі зросли. Інтенсивність закономірних відмов знизилася.

Таблиця 1 – Результати тестових протиаварійних тренувань ОДП

Показники без використання СППР	Показники з використанням СППР
$q_1 = 4,80$ $q_2 = 1,00$ $q_3 = 0,50$ $q_4 = 2,20$ $q_5 = 0,20$ $q_6 = 0,20$ $q_7 = 1,80$	$q_1 = 4,96$ $q_2 = 1,00$ $q_3 = 0,34$ $q_4 = 1,24$ $q_5 = 0,14$ $q_6 = 0,12$ $q_7 = 0,55$
$\alpha = 4,8/10,7 = 0,4486$ $\rho = 1 - 4,1/10,7 = 0,6168$ $\beta = 1 - 2,7/10,7 = 0,7477$ $\gamma = 1 - 0,4/10,7 = 0,9626$ $\delta = 1 - 4,0/10,7 = 0,6262$	$\alpha = 4,96/8,35 = 0,5940$ $\rho = 1 - 2,84/8,35 = 0,6599$ $\beta = 1 - 1,58/8,35 = 0,8108$ $\gamma = 1 - 0,26/8,35 = 0,9689$ $\delta = 1 - 1,79/8,35 = 0,7856$
$\lambda = 0,048$, відмов/міс.	$\lambda = 0,037$, відмов/міс.
$Y = c_1 P_1 2,8$	$Y = c_2 P_2 0,92$

На основі проведених досліджень, розробки математичних моделей і практичного тестування програмного забезпечення СППР можна сформулювати такі результати дослідження:

- розроблено формально-логічну модель колокацій професійних концептів;
- побудовано базу знань на основі підмножини лінгвістичного корпусу ліквідації аварій та запобігання їм в енергосистемі;
- побудовано загальний тезаурус професійної лексики;
- побудовано спеціалізований тезаурус професійних термінів і сленгу;
- проведено статистичну обробку вихідної лексичної вибірки та професійних тезаурусів;

– розроблено критерії оперативного моніторингу застосування тезауруса бази знань професійного лінгвістичного корпусу ліквідації аварій в енергосистемі;

– показано практичну цінність і значимість розроблених моделей і критеріїв оцінювання ефективності бази професійних концептів.

Обговорення результатів дослідження. Практична корисність отриманих результатів передбачає наступне. Обсяг тезауруса значно менший за початковий мовний корпус, тому створення, подання, сприйняття й інтерпретація фактів за допомогою тезауруса стають набагато простішими. Застосування тезауруса систематизує побудову та використання баз знань у розумних системах. Розроблений підхід дає можливість побудувати уніфіковані системи підтримки прийняття рішень для різних професійних сфер та скоротити час, необхідний для розробки систем підтримки прийняття рішень, що робить їх більш дешевими. Застосування моделі онтології до професійної галузі доцільне через специфічну структуру професійної лексики. Отримані залежності показують, що збільшений обсяг професійної лексики збільшує надмірність тексту швидше, ніж обсяг тезауруса, що пояснюється підвищеною ефективністю останнього. Очевидно, що для загального словника ефективність онтологічних моделей знизиться через необхідність використання більшого тезауруса. Ось чому моделі онтології доцільно використовувати в конкретних професійних галузях, відомих широким колом професійних термінів (професійний сленг та аббревіатури). Отримані результати дослідження сприятимуть створенню онтологічних моделей для різних форм представлення знань.

Запропоновані в статті рішення спрямовані на автоматизацію оперативного моніторингу аварійних ситуацій в енергосистемах. Розроблені показники ефективності професійних тезаурусів дають змогу програмно реалізувати систему підтримки рішень для управління аварійним режимом енергосистеми. Результатом циклу роботи протиаварійної системи є рекомендації на базі диспетчерських нормативно-інструктивних матеріалів, а також значення корегувальних впливів. Після розробки СППР вона може бути впроваджена в комплекс апаратно-програмних засобів діючої АСДУ енергосистеми. Переважни-

ми точками впровадження протиаварійної СППР є блок автоматизованих робочих місць, блок технологічної мережі обміну даними, блок збору даних і телеуправління.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Узагальнення результатів тренувань ОДП дає можливість зробити наступні висновки про доцільність і оперативну ефективність застосування інкорпорації професійних онтологій у практиці диспетчерського керування ЕЕС в аварійних ситуаціях, а саме:

- оперативні характеристики ОДП, що працює разом з СППР, підвищилися на 20,29 %;
- інтенсивність відмов диспетчерських змін скоротилася на 22,92 %;
- умовний збиток від недовідпуску електроенергії скоротився на 67,14 %.

Таким чином, підтверджено практичний позитивний ефект застосування багаторівневої онтологічної БЗ на підвищення оперативної ефективності роботи ОДП.

Як перспективу подальших досліджень можна відзначити напрям оперативного моніторингу використання баз знань, побудованих на основі колокацій семантичних мереж і продукцій.

Список використаних джерел

- [1] "Аварийность в энергосистеме Украины за год выросла вдвое", *Unian.net*, 2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.unian.net/economics/energetics/1073586-avariynost-v-energosisysteme-ukrainyi-za-god-vyroslo-vdvoe.html>.
- [2] Y. Besanger, M. Eremia, and N. Voropai, "Major grid blackouts: Analysis, classification, and prevention", in *Handbook of electrical power system dynamics: Modeling, stability, and control*. New Jersey: Wiley, IEEE Press, 2013, pp. 789-863.
- [3] С. Смоловик, "Роль "человеческого фактора" в развитии крупных системных аварий", *Elektroenergetika*, vol. 1, no. 1, pp. 16-19, 2008.
- [4] SCADA System. Application Guide, 1st ed. Milwaukee: Allen-Bradley, Rockwell Automation, 2005, p. 420.
- [5] Міністерство палива та енергетики України. Державне підприємство Національна енергетична компанія "Укренерго", "Інструкція ДС-8 щодо запобігання і ліквідації технологічних порушень в електричній частині електростанцій і електричних мереж регіону Дніпровської ЕС", *Дніпровська електроенергетична система*, Запоріжжя, 2008.
- [6] А. А. Башлыков, и А. П. Еремеев, *Основы конструирования интеллектуальных систем поддержки принятия решений в атомной энергетике*. Москва: ИНФРА-М, 2017.
- [7] А. М. Глазунова, и И. Н. Колосок, "Решение задач диспетчерского управления интеллектуальными электроэнергетическими системами на базе методов оценивания состояния", в *Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление*. Иркутск, 2015, с. 1-8.
- [8] M. Negnevitsky, N. Tomin, D. Panasetsky, and V. Kurbatsky, "Intelligent approach for preventing large-scale emergencies in electric power systems", in *IEEE Int. Conf. on Electric Power Engineering PowerTech*, France, 2013, pp. 1-6.
- [9] С. А. Гришанов, та Н. А. Канашевич, "Реалізація експертної системи для діагностики генераторів теплових електричних станцій", в *Зб. наук. праць X Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених і спеціалістів*, Кременчук, 2012, с. 305-306.
- [10] С. А. Баркалов, А. В. Душкин, и С. А. Колодяжный, *Введение в системное проектирование интеллектуальных баз знаний*. Москва: Горячая линия-Телеком, 2017.
- [11] А. Н. Антамошин, О. Н. Близнава, и А. А. Большаков, *Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами*, 2-е изд. Москва: Горячая линия-Телеком, 2016.
- [12] Ю. Я. Любарский, *Интеллектуальные информационные системы*. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.
- [13] А. А. Азарян, та І. А. Котов, "Структурно-логічна модель фактів як засіб репрезентації характеристик компонентів електроенергетичних систем", *Гірничий вісник: наук.-техн. зб. Кривий Ріг*, № 103, с. 136-141, 2018.
- [14] K. Iskandar, M. Jambak, R. Kosalaa, and H. Prabowo, "Current issue on knowledge management system for future research: A systematic literature review", in *2nd Int. Conf. on Computer Science and Computa-*

- tional Intelligence (ICSCSI) 2017*, Bali, 2017, pp. 68-80.
- [15] V. Morkun, and I. Kotov, "Information technologies for power supply dispatch control based on linguistic corpus ontologies", *Науковий вісник Національного гірничого університету: зб. наук. пр.*, Дніпро: НТУ "Дніпровська політехніка", № 6 (174), с. 130-136, 2019.
- [16] С. Деверадж, и Р. Кохли, "Тайны ИТ. Измерение отдачи от инвестиций в информационные технологии". Москва: Бук-Пресс, 2006.
- [17] В. Липаев, *Выбор и оценивание характеристик качества программных средств: методы и стандарты*. Москва: Синтег, 2001.
- [18] Б. Железко, и О. Синявская, "Методы оценки эффективности интеллектуальных компонент систем поддержки принятия решений", *Научные труды Белорусского государственного экономического университета: сб. / В. Н. Шимов и др. (редкол.)*. Минск: БГЭУ, 2010, с. 139-144.
- [19] А. Л. Рыжко, Н. М. Лобанова, Н. А. Рыжко, и Е. О. Кучинская, *Экономика информационных систем*. Москва: Финансовый ун-т, 2014.
- [20] Міністерство палива та енергетики України. Державне підприємство Національна енергетична компанія "Укренерго", "Інструкція по ліквідації аварій і технологічних порушень режиму в електричних мережах ВАТ ЕК "Дніпрообленерго", *Дніпровська електроенергетична система*. Запоріжжя, 2007.
- [21] А. Ф. Дьяков, И. Е. Лековец, Г. В. Меркурьев, и А. Д. Щербаков, "Оценка противоаварийных тренировок оперативно-диспетчерского персонала энергосистем", *Электрические станции*, т. 2, с. 58-65, 1997.
- [22] Г. В. Меркурьев, *Оперативно-диспетчерское управление энергосистемами*. Санкт-Петербург: Центр подготовки кадров энергетики, 2002.
- <https://www.unian.net/economics/energetics/1073586-avariynost-v-energosisteme-ukrainyi-za-god-vyirosla-vdvoe.html> [in Russian].
- [2] Y. Besanger, M. Eremia, and N. Voropai, "Major grid blackouts: Analysis, classification, and prevention", in *Handbook of electrical power system dynamics: Modeling, stability, and control*. New Jersey: Wiley, IEEE Press, 2013, pp. 789-863.
- [3] S. Smolovik, "The role of the "human factor" in the development of major systemic accidents", *Elektroenergetika*, vol. 1, no. 1, pp. 16-19, 2008 [in Russian].
- [4] SCADA System. Application Guide., 1st ed. Milwaukee: Allen-Bradley, Rockwell Automation, 2005, p. 420.
- [5] Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. State Enterprise National Energy Company "Ukrenergo", "DS-8 instruction for the prevention and elimination of technological disruptions in the electrical part of power plants and electrical grids in the Dnieper ES region", *Dnieper electric power system*, Zaporizhzhya, 2008 [in Ukrainian].
- [6] A. A. Bashlykov, and A. P. Eremeev, *Fundamentals of designing intelligent decision support systems in nuclear power*. Moscow: INFRA-M, 2017 [in Russian].
- [7] A. M. Glazunova, and I. N. Kolosok, "Solving dispatch control problems for intelligent electric power systems based on state estimation methods", in *Energy of Russia in the XXI century. Innovative development and management*. Irkutsk, 2015, pp. 1-8 [in Russian].
- [8] M. Negnevitsky, N. Tomin, D. Panasetsky, and V. Kurbatsky, "Intelligent approach for preventing large-scale emergencies in electric power systems", in *IEEE Int. Conf. on Electric Power Engineering PowerTech*, France, 2013, pp. 1-6.
- [9] S. A. Grishanov, and N. A. Kanashevich, "Implementation of an expert system for diagnostics of generators of thermal power plants", in *Collection of scientific papers of the X Int. Sci. and Tech. Conf. of Young Scientists and Specialists*, Kremenchuk, 2012, pp. 305-306 [in Ukrainian].
- [10] S. A. Barkalov, A. V. Dushkin, and S. A. Kolodyazhny, *Introduction to system design of intelligent knowledge bases*. Mos-

References

- [1] "The emergency in the energy system of Ukraine has doubled in a year", *Unian.net*, 2021. [Online]. Available:

- cow: Goryachaya liniya-Telekom, 2017 [in Russian].
- [11] A. N. Antamoshin, O. N. Bliznova, and A. A. Bol'shakov, *Intelligent management systems for organizational and technical systems*, 2nd ed. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2016 [in Russian].
- [12] Yu. Ya. Lyubarskij, *Intelligent information systems*. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1990 [in Russian].
- [13] A. A. Azaryan, and I. A. Kotov, "Structural-logical model of facts as a means of representing the characteristics of the components of electric power systems", *Hirnychi visnyk: sci.-tech. coll. Kryvyi Rih*, no. 103, pp. 136-141, 2018 [in Ukrainian].
- [14] K. Iskandar, M. Jambak, R. Kosalaa, and H. Prabowo, "Current issue on knowledge management system for future research: A systematic literature review", in *2nd Int. Conf. on Computer Science and Computational Intelligence (ICCSCI) 2017*, Bali, 2017, pp. 68-80.
- [15] V. Morkun, and I. Kotov, "Information technologies for power supply dispatch control based on linguistic corpus ontologies", *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu: coll. of sci. works, Dnipro: NTU "Dniprov'ska politekhnika"*, no. 6 (174), pp. 130-136, 2019.
- [16] S. Deveradzh, and R. Kohli, "Secrets of IT. Measuring of return on investment in information technology". Moscow: Buk-Press, 2006 [in Russian].
- [17] V. Lipaev, *Selection and evaluation of characteristics of software quality: Methods and standards*. Moscow: Sinteg, 2001 [in Russian].
- [18] B. Zhelezko, and O. Sinyavskaya, "Methods for assessing the effectiveness of intellectual components of decision support systems", *Nauchnyye trudy Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta: coll. / V. N. Shimov et al. (ed. board)*. Minsk: BGEU, 2010, pp. 139-144 [in Russian].
- [19] A. L. Ryzhko, N. M. Lobanova, N. A. Ryzhko, and E. O. Kuchinskaya, *Economics of information systems*. Moscow: Finansovyy un-t, 2014 [in Russian].
- [20] Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. State Enterprise National Energy Company "Ukrenergo", "Instruction for eliminating accidents and technological disturbances in electrical networks of VAT EK "Dniprobenergo", *Dnieper electric power system*. Zaporizhzhia, 2007 [in Ukrainian].
- [21] A. F. Dyakov, I. E. Lekovec, G. V. Merkurev, and A. D. Sherbakov, "Evaluation of emergency training of operating and dispatching personnel of power systems", *Elektricheskiye stantsii*, vol. 2, pp. 58-65, 1997 [in Russian].
- [22] G. V. Merkurev, *Operational dispatch control of power systems*. St. Petersburg: Tsentr podgotovki kadrov energetiki, 2002 [in Russian].

V. S. Morkun, *D.Tech.Sc., professor*,

I. A. Kotov, *Ph.D., associate professor*

Kryvyi Rih National University

Vitaliy Matusevych st., 11, Kryvyi Rih, 50027, Ukraine

e-mail: rioexito@gmail.com

CRITERIA FOR OPERATIONAL MONITORING OF PROFESSIONAL CONCEPTS BASE OF THE COMPLEX OF POWER SYSTEM CONTROL AUTOMATION

The article is devoted to the problem of developing criteria for operational monitoring and evaluating the effectiveness of an intelligent decision support system for emergency control of power systems modes based on the use of professional concepts and specialized thesauruses. Criteria for calculating the efficiency of using professional concepts of the thesaurus of knowledge on the automation of emergency response in the power system are proposed.

Scientific novelty lies in the development and application of efficiency coefficients of the thesaurus of professional vocabulary, based on the presentation of professional concepts of knowledge about

the elimination of accidents in the power system. The obtained indicators allow us to assess the degree of professionalism and effectiveness of the linguistic corpus and build productive knowledge bases. In contrast to the existing approaches to building knowledge bases, the proposed approach makes it possible to unify the design of decision support systems and reduce the time of their implementation.

Practical significance of the results obtained is in assessing the effectiveness of using professional knowledge to build unified intelligent decision support systems in the field of emergency management of power systems. The results of the work consist in ensuring operational monitoring of the effectiveness of using the knowledge base of professional concepts of terms and slang. The model for assessing the effectiveness of a professional thesaurus, based on the ratio of growth rates of general and specialized professional thesaurus is proposed.

Research results prove that professional thesauruses are becoming more effective as they move to more specific specialized scientific and technical fields.

Keywords: *dispatch control, ontology, thesaurus, colocation, semantics, abbreviation.*

[0000-0002-5902-8628] Я. В. Тарасенко, к.т.н.

e-mail: yaroslav.tarasenko93@gmail.com

Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ І ЗБЕРЕЖЕННЯ НЕПОДІЛЬНОЇ СЕМАНТИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ АНГЛОМОВНОГО МАНІПУЛЯТИВНОГО ТЕКСТУ ПРОПАГАНДНОГО ДИСКУРСУ НА ОСНОВІ КВАНТОВОГО ФОРМАЛІЗМУ

У статті проведено дослідження особливостей використання квантового формалізму в задачах комп'ютерного аналізу та обробки маніпулятивних текстів. Розроблений метод виявлення і збереження неподільної семантичної складової маніпулятивного тексту пропагандного дискурсу дає можливість підвищити ефективність виявлення і збереження неподільної семантичної складової порівняно з методами семантичного стиснення, що базуються на інформаційній ентропії тексту, що дає змогу виокремити та зберегти ключові індивідуальні семантичні конструкції, притаманні психолінгвістичному портрету зловмисника для подальшого впровадження в них зворотного впливу. Змодельовано роботу системи визначення реми маніпулятивного англomовного тексту та проведено порівняння з результатами роботи системи семантичного стиснення, що доводить можливість подолання межі семантичного стиснення. Попередні експериментальні дані дають змогу стверджувати про високу ефективність розробленого методу. Окреслено перспективи використання подібного методу в процесі забезпечення інформаційної безпеки.

Ключові слова: визначення теми, визначення реми, протидія пропаганді, протидія маніпулятивним текстам, психолінгвістичний портрет, квантово-семантичний аналіз.

Вступ. Згідно з чинною Доктриною інформаційної безпеки України [1] забезпечення національних інтересів держави в інформаційній сфері, зокрема захист від руйнівних інформаційно-психологічних впливів, є пріоритетним та актуальним завданням. Допускається, що організація зворотного впливу на пропагандиста є тим необхідним засобом, що дасть можливість підвищити ефективність протидії злочинному інформаційному впливу на свідомість громадян та нівелювати наслідки. Для вбудовування націленого на зловмисника контейнера використовується його психолінгвістичний портрет, отриманий завдяки квантово-семантичному психолінгвістичному аналізу [2]. Однак для вбудовування необхідного контейнера знання про психолінгвістичний портрет пропагандиста є необхідною, проте недостатньою умовою. Для підвищення ефективності сприйняття та зменшення шансу можливої протидії зворотному впливу необхідно виокремити та зберегти неподільну семантичну складову маніпулятивного тексту для подальшого комп'ютеризованого форму-

вання зворотного тексту відповідно до психолінгвістичного портрету пропагандиста [3].

Ключовою у цьому контексті виступає саме потреба в методиках виявлення неподільної семантичної складової, які було б легко формалізувати і, відповідно, реалізувати за допомогою інформаційних систем.

Більшість сучасних методів виокремлення базової семантичної складової [4–6] ґрунтуються на семантичному стисненні тексту. В роботі [7] визначається межа семантичного стиснення, однак досягти її без значних втрат семантики вкрай важко. В дослідженні маніпулятивного тексту пропагандного дискурсу важливим є збереження притаманних зловмиснику маркерів маніпулятивного характеру, а той факт, що текст англomовний, зумовлює необхідність врахування сталого порядку слів. В такому разі використовується методика актуального членування речення для виділення теми та реми як окремого речення, так і всього тексту. В роботах [8–10] описується застосування цього підходу. Особливе значення має робота [9], де розглядається ідеологічне пред-

ставлення результатів аналізу, що доцільно при дослідженні текстів маніпулятивного характеру. Однак подібні методи потребують доопрацювання та формалізації. Таким чином, невирішеною залишається задача врахування невизначеності теми/реми при семантичному стисненні, в результаті чого може бути забезпечено захист реми від видалення, а отже, і збереження неподільної семантичної складової англomовного тексту.

Мета дослідження полягає у підвищенні ефективності виявлення та збереження неподільної семантичної складової англomовного тексту, що дасть можливість ефективніше протидіяти маніпулятивним текстам пропагандного дискурсу шляхом здійснення зворотного впливу на пропагандиста за рахунок його індивідуального психолінгвістичного портрету.

В роботі ставляться наступні **задачі дослідження**:

1. Визначення теми та монореми.
2. Визначення дирими.
3. Кореляція реми з пропагандним дискурсом.
4. Збереження реми.

Для виявлення і збереження неподільної семантичної складової пропонується використання квантового формалізму в задачах комп'ютерної лінгвістики [11]. Закони формальної семантики [12], синонімічний розподіл та метод контент-аналізу семантичної частки [13] використовуються для визначення теми та монореми. Метод визначення координат семантичної частки при відомому психолінгвістичному портреті пропагандиста [14], правила побудови англomовного речення та тексту і метод контент-аналізу семантичної частки [13] використовуються для визначення дирим. В свою чергу, власне квантовий формалізм [11] разом із методом квантово-семантичного психолінгвістичного аналізу англomовного тексту пропагандного дискурсу [2] та контент-критеріями семантичної категорії психолінгвістичного портрету [15] застосовується для кореляції реми з пропагандним дискурсом. Збереження реми відбувається із використанням методу контент-аналізу семантичної частки [13].

Виклад основного матеріалу. З метою пояснення базових механізмів, що лежать в основі процесу виявлення і збереження непо-

дільної семантичної складової тексту, необхідно надати визначення.

Темою тексту при здійсненні інформаційного впливу виступає функціональний блок тексту, який вже є відомим об'єкту здійснення інформаційного впливу.

Ремою тексту при здійсненні інформаційного впливу виступає функціональний блок тексту, який ще є невідомим об'єкту здійснення інформаційного впливу.

Диремою тексту виступає функціональний блок, в якому тема пов'язана з попередніми темами тексту (може виступати як темою, так і ремою).

Функціональний блок може бути як темою, так і ремою залежно від суб'єкта здійснення інформаційного впливу та при повторі попередньої вже відомої інформації.

Визначення теми та реми неможливе без контексту. Звідси випливає, що тему та рему можна вважати ядром семантики, а оточуючі лексико-граматичні структури речення – вказівниками. Виходячи з визначень, вказівники на тему можна вилучити без шкоди для індивідуальної семантики тексту пропагандного дискурсу. Водночас постає задача визначення теми та реми та, оскільки тема та рема перебувають у квантовій невизначеності, то стабілізації системи тема-рема.

Виокремлення теми, монореми та дирими. Виходячи з [13], при дослідженні розподілу синонімів можливо визначити тему тексту та підтеми, однак, необхідно визначати лише множину підтем $Z(1)$:

$$Z = O_{0_n}^m - O'_{0_n}, \quad (1)$$

де $O_{0_n}^m$ – множина початкових синонімічних об'єктів O_{0_n} , розподілених по m групах; O'_{0_n} – головна тема тексту, що визначається за (2):

$$O'_{0_n} = \sum_{k=1}^m O_{0_n}^k. \quad (2)$$

Основна тема тексту видаляється, оскільки відноситься до усього тексту загалом і не матиме відповідної реми в цьому випадку.

Таким чином, кожна з підмножин z множини підтем Z буде складатися з синонімічного ряду $\sum_{i=1}^m z_i$, що належить одній із

m синонімічних груп. Зі сформульованих на початку статті визначень випливає, що початковий елемент z_0 кожної з m синонімічних груп, або множина z у випадку, коли $|z|=1$, буде ремою в усіх випадках, окрім зумовлених квантовою невизначеністю стану системи теми/реми згідно з психолінгвістичним портретом зловмисника. Решта елементів будуть ремою лише у випадках, зумовлених квантовою невизначеністю системи. Крім того, в результаті синонімічного зв'язку елементів рема, пов'язана з такою темою, буде диремою і безпосередньо потребує розгляду.

Зв'язний осмислений текст T завжди є послідовністю функціональних блоків, що розкривають суть попереднього вислову (3):

$$T = \sum_{i=1}^n (U + R)_i, \quad (3)$$

де U – тема; R – рема.

В такому випадку рема є моноремою та визначається шляхом пошуку нової, доданої інформації (4), адже можна стверджувати, що тема кожного наступного вислову є ремою попереднього, за винятком дирема:

$$R_n = T - U_n - \sum_{i=1}^{n-1} (U + R)_i. \quad (4)$$

В свою чергу, дирему можна знайти, знаючи тему (елемент множини z) і знайшовши вказівник на ядро семантики, яким є рема. Ядро треба шукати, базуючись на категоріальних ознаках семантичної одиниці із переходом на найвищий ступінь ієрархії [14].

Таким чином, можна позначити два різновиди ядра семантики: ядро семантики, що відповідає темі D' , та ядро семантики, що відповідає ремі D'' . Необхідно знайти D'' , знаючи z та проаналізувавши вказівник на ядро семантики. Оскільки вказівник на ядро семантики може бути не одним словом, а словосполученням чи групою словосполучень, то можливо позначити групу вказівника на ядро семантики, що відповідає темі d' , та групу вказівника на ядро семантики, що відповідає ремі d'' . В такому випадку d'' визначатиметься за формулою (5):

$$d'' = \{B_m^j \mid z_n \notin B_m^j\}, \quad (5)$$

де B_m^j – найвище категоріальне значення з j категоріальних значень, яке відноситься до m -ї групи.

Відповідно до сталого порядку слів в англійській мові та висновків, отриманих в [13], що визначають осмислену лінгвістичну інтерпретацію теми тексту, група вказівника на ядро семантики, що відповідає ремі, буде виглядати (6):

$$d'' = B_{noun}^j + B_{verb}^j + B_{adj}^j, \quad (6)$$

де B_{noun}^j , B_{verb}^j , B_{adj}^j – найвищі категоріальні значення синонімічної конструкції, відповідно, іменника, дієслова та прикметника в послідовній хронології, пов'язаних з синонімічною групою теми z .

В такому випадку дирема буде визначатись як (7):

$$D'' = z_n \cdot d''_n. \quad (7)$$

В свою чергу, група вказівника на ядро семантики, що відповідає темі d' , буде визначатись аналогічно (8):

$$d' = B_{noun}^j + B_{verb}^j + B_{adj}^j, \quad (8)$$

при виконанні умови (9):

$$d'' = \{B_m^j \mid z_n \in B_m^j\}. \quad (9)$$

Неподільна семантична складова тексту загалом буде сумою всіх монорем та дирем, що в ньому наявні. Однак маніпулятивний текст пропагандного дискурсу має особливості, пов'язані з психолінгвістичним портретом зловмисника, від якого залежатиме стан системи тема-рема, оскільки, як вже зазначалося, система тема-рема знаходиться в квантовій невизначеності, а отже, рема може бути одночасно темою і ремою.

Кореляція реми з пропагандним дискурсом. Основний засіб визначення реми в пропагандному дискурсі – квантовий формалізм у зв'язку з використанням методів квантово-семантичного психолінгвістичного аналізу [2]. Однак, перш ніж перейти безпосередньо до ідентифікації реми в системі тема-рема, необхідно співвіднести її з психолінгвістичним портретом пропагандиста, що й буде впливати на процедуру квантування.

В [15] описується класифікація складників семантичної категорії психолінгвістичного портрету, де найвища категорія буде відповідати формулам (6), (8). Звідси випливає, що досліджуваний об'єкт тексту, який є підкатегорією III роду, і найвища категорія, визначена в ході аналізу теми та реми, вказують на відповідну характеристику психолінгвістичного портрету автора, що робить психолінгвістичний вплив (відбиток особистості, демографічний профіль чи детермінація психологічного портрету відповідно до методів впливу) відповідно до загального логічного рівня досліджуваного об'єкта. Таким чином, логічний рівень L^h буде розкладатися на п'ять підпросторів значень (10):

$$L^h = L_1 \oplus L_2 \oplus L_3 \oplus L_4 \oplus L_5, \quad (10)$$

де h – характеристика психолінгвістичного портрету, на яку впливає логічний рівень; L_1 – логічний рівень переконань та цінностей; L_2 – логічний рівень особистої своєрідності; L_3 – логічний рівень оточення; L_4 – логічний рівень поведінки; L_5 – логічний рівень можливостей, при виконанні умови (11):

$$\forall L, B^3 \in B^2 \in B^1 \in B^j \in L, \quad (11)$$

де B^3 – підкатегорія III роду (досліджуваний об'єкт тексту); B^2 – підкатегорія II роду; B^1 – підкатегорія I роду; B^j – найвища категорія.

Оскільки кожен із п'яти логічних рівнів складається з множини B^j , кожна з яких, в свою чергу, містить від одного до трьох елементів, які можна зіставити з частинами мови в наступній відповідності: іменник – означення предмета, дієслово – дія, прикметник – прикмети, то справедливе твердження (12):

$$\begin{cases} L \in d' \\ L \in d'' \end{cases} \mid \forall L \in L^h. \quad (12)$$

У процесі верифікації реми варто використати квантовий формалізм.

В [11] квантовий формалізм виступає в ролі інструменту опису просторів станів концептів. Для вирішення задачі, поставленої в статті, цей інструмент найкраще підходить з двох причин: складники семантичної категорії психолінгвістичного портрету можна

вважати концептами в рамках класифікації семантичної категорії; квантовий формалізм лежить в основі квантово-семантичного психолінгвістичного аналізу. Згідно з [11] для отримання імовірності того, що ядро семантики є ремою у разі дослідження дирем, вектор початкового стану семантичної одиниці необхідно записати у вигляді деякої множини базисних станів системи тема-рема (два базисні стани: тема і рема). Вибір базового стану визначається пропагандистом і процедурою квантування. Тоді для відповідника у квантовому формалізмі – оператора (13) необхідно:

$$\hat{A}|\varphi i\rangle = L^h, \quad (13)$$

де $\hat{A}$ – оператор; $|\varphi i\rangle$ – базисний стан.

Визначений за допомогою квантово-семантичного психолінгвістичного аналізу [2] психолінгвістичний портрет також вплине на визначення реми. Таким чином, враховуючи хвильові особливості тексту відповідно до сприйняття семантики автором та логічні рівні я-концепції особистості нарівні з характеристикою психолінгвістичного портрету пропагандиста, функція (14) буде визначати вагу кожного логічного рівня для реального стану системи:

$$F: V_{\langle e, t \rangle, S_2^*, W^{L^h} L^{S_2^*} W^{L^h}} \quad (14)$$

де $V_{\langle e, t \rangle}$ – предикативна константа; S_2^* – індикаторні семантичні елементи; W^{L^h} – світ сприйняття пропагандистом дійсності відповідно до притаманних йому рівнів я-концепції особистості. Екстремум функції буде вказувати на переважання відповідних логічних рівнів.

В такому випадку, знаючи вагу кожного логічного рівня для реального стану системи, можна обчислити імовірність $|\psi^D\rangle$ одного з базисних станів ядра семантики за формулою (15) і визначити чи ядро семантики є темою, чи ремою:

$$|\psi^D\rangle = \sum_i F: V_{\langle e, t \rangle, S_2^*, W^{L^h} L^{S_2^*} W^{L^h}} |\varphi i\rangle, \quad (15)$$

де $\{|\varphi i\rangle\}$ – множина базисних станів системи.

Збереження реми. Усе вищезазначене є узагальненою моделлю визначення реми, однак, виходячи з визначень, тема та рема по-

стійно взаємозамінюються в ході розвитку семантичної лінії тексту. А отже, ядро семантики, що було ремою, в наступній структурній одиниці тексту буде темою, як інформація, що вже є відомою об'єкту здійснення впливу. Таким чином, розгляд тексту повинен здійснюватися послідовно, що виключає дослідження тексту частинами і не в хронологічній послідовності та вимагає введення додаткової темпоральної характеристики з метою збереження реми на усьому часовому проміжку розвитку семантичної лінії тексту.

Виходячи з формул [13], що визначають множини семантичних часток усіх п'яти рівнів я-концепції, можна вирахувати множину ядер семантики за усіма логічними рівнями (16) з урахуванням імовірності того, що ядро семантики є диремою та з огляду на часову характеристику:

$$M_L = \{B_L^{m_i} \in U(P(D^n)) \mid \max_{[a;b]} F[B_L^{m_i}]\}, \quad (16)$$

де $U(P(D^n))$ – множина тем з високою імовірністю того, що вони є ремою; $F[B_L^{m_i}]$ – функція, яка описується кривою, проведеною за множиною величин ентропії категоріальних значень $B_L^{m_i}$ за усіма логічними рівнями на відрізьку від a до b за часовою лінією розвитку семантики тексту відповідно до законів логічного і послідовного розвитку семантики тексту.

Таким чином, множина збережених рем R^* може бути визначена за формулою (17):

$$R^* = \{D'' - D' - d'' + R_n \mid D'' \in M_L\}. \quad (17)$$

Інакше кажучи, необхідно видалити усі теми, що не є ремою на момент послідовного дослідження тексту, а також власне вказівник на ядро семантики. В такому разі сума рем та дирем становитиме неподільну семантичну складову англомовного тексту пропагандного дискурсу, що несе в собі маркер психолінгвістичного портрету пропагандиста та вже адаптована до квантово-семантичної обробки.

Результати досліджень. В роботі розроблено метод виявлення і збереження неподільної семантичної складової англомовного маніпулятивного тексту пропагандного дискурсу, що базується на квантовому формалізмі для формалізації й адаптації методів визна-

чення реми тексту до квантово-семантичного дослідження, що дає змогу більш ефективно і точно виявляти ключові семантичні елементи маніпулятивного тексту та зберігати їх для здійснення зворотного впливу на зловмисника, шляхом квантово-семантичної лінгвістичної стеганографії.

Водночас визначення теми проводиться на основі синонімічного розподілу, що дає змогу із застосуванням законів формальної семантики та методу контент-аналізу семантичної частки визначити монорему, яка є одним із елементів неподільної семантичної складової наряду з диремою.

Дирема визначається шляхом застосування методу визначення координат семантичної частки при відомому психолінгвістичному портреті пропагандиста на основі правил побудови англомовного речення та тексту із використанням методу контент-аналізу семантичної частки, що дає змогу сформулювати загальну модель визначення реми з відривом від загальної структури тексту в часовому проміжку розвитку семантики.

Кореляція реми з пропагандним дискурсом здійснюється на основі квантового формалізму із застосуванням методу квантово-семантичного психолінгвістичного аналізу англомовного тексту пропагандного дискурсу шляхом врахування контент-критеріїв семантичної категорії психолінгвістичного портрету для стабілізації системи тема-рема, яка перебуває у квантовій невизначеності, спричиненій психолінгвістичним портретом суб'єкта здійснення впливу.

Збереження реми відбувається шляхом використання методу контент-аналізу семантичної частки для отримання можливості подальшого здійснення маніпуляцій з неподільною семантичною складовою, ґрунтуючись на часовій характеристиці розвитку семантичної лінії тексту.

Обговорення результатів. Моделювання функціонування розробленого методу за попередніми даними порівняно з експериментальними даними роботи аналогів дає змогу прогнозувати ефективність. Так, на рисунку 1 зображено графік залежності об'єму залишкового тексту від об'єму початкового.

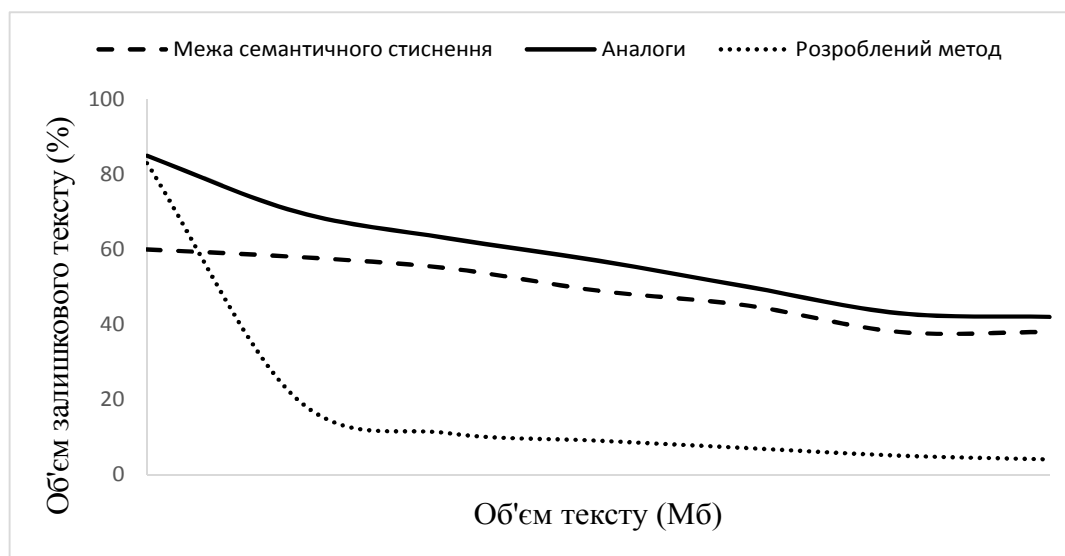


Рисунок 1 – Залежність об'єму залишкового тексту від об'єму початкового

Як видно з графіка, виділення семантичної складової за допомогою семантичного стиснення передбачає наявність межі семантичного стиснення, подолання якої несе в собі загрозу втрати значної частини семантики тексту. Запропонований метод позбавлений цього недоліку і долає межу семантичного стиснення, в результаті чого отримується залишкова неподільна семантична складова, яка передбачає

наявність значно меншого відсотка початкового тексту порівняно з аналогами.

До того ж, ефективність використання розробленого методу обумовлена і низькою імовірністю виникнення похибки, яка полягає у виокремленні другорядної інформації, що має надлишковість і не є неподільною семантичною складовою (рисунок 2). Це позитивно вплине на вбудовування зворотного впливу.

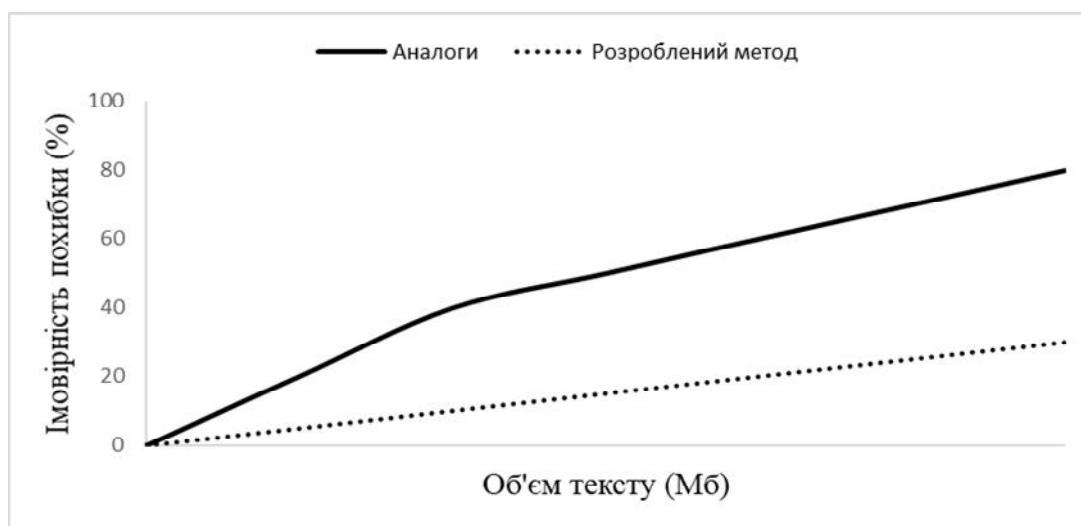


Рисунок 2 – Залежність імовірності виникнення похибки від об'єму початкового тексту

Недолік запропонованого методу полягає у значних ресурсах, які необхідні на проведення обчислень, а відповідно і час обчислень буде збільшуватись прямо пропорційно до зменшення виділених системі ресурсів.

Однак описані переваги та ефективність нівелюють цей недолік.

Висновки. Розроблений метод виявлення і збереження неподільної семантичної складової маніпулятивного тексту пропагандного

дискурсу дає можливість підвищити ефективність виявлення і збереження неподільної семантичної складової за рахунок використання квантового формалізму порівняно з методами семантичного стиснення, що базуються на інформаційній ентропії тексту. Метод дає змогу виокремити та зберегти ключові індивідуальні семантичні конструкції, притаманні психолінгвістичному портрету зловмисника, які неможливо змінити чи видалити без втрати базової семантики, для подальшого впровадження в них зворотного впливу.

Порівняння з аналогічними методами показує можливість подолання межі семантичного стиснення без втрати семантики, що значно зменшує результуючу множину семантичних категорій та підвищує ефективність виділення неподільної семантичної складової за рахунок зменшення кількості надлишкових і неточних семантичних складників.

Практичне значення має також формалізація методів визначення реми, що завдяки застосованому квантовому формалізму адаптована до використання в квантово-семантичному аналізі та в квантово-семантичній лінгвістичній стеганографії для протидії інформаційній пропаганді.

Результати, описані в статті, дадуть можливість провести вбудовування індивідуальної семантичної лінії пропагандиста в неподільну семантичну складову тексту з метою підвищення ефективності зворотного прихованого інформаційного впливу на зловмисника.

Список використаних джерел

- [1] Указ Президента України, Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 29 грудня 2016 р. "Про Доктрину інформаційної безпеки України". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/47/2017#Text>. Дата звернення: Січ. 21, 2021.
- [2] Ya. Tarasenko, "The quantum-semantic psycholinguistic analysis method for the english-language text of propaganda discourse", *Advanced Information Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 62-68, 2019.
- [3] Я. В. Тарасенко, "Метод комп'ютеризованого формування англомовного тексту відповідно до психолінгвістичного портрету пропагандиста", *Захист інформації*, т. 22, № 2, с. 66-73, 2020.
- [4] B. Hale, "Essence and definition by abstraction", *Synthese*, 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11229-018-1726-7>. Дата звернення: Лют. 2, 2021.
- [5] D. Ceglarek, "Semantic compression for text document processing", *Transactions on Computational Collective Intelligence XIV*, vol. 13, pp. 20-49, 2014.
- [6] Я. В. Тарасенко, О. Б. Півень, та І. М. Федотова-Півень, "Метод семантичного стиснення текстової інформації для протидії комп'ютерній лінгвістичній стеганографії", *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, № 3 (32), с. 68-78, 2018.
- [7] Я. В. Тарасенко, та О. Б. Півень, "Особенности обчислення інформаційної ентропії тексту в умовах проведення атаки семантичним стисненням на лінгвістичну стегосистему", *Безпека інформації*, т. 24, № 2, с. 124-129, 2018.
- [8] M. Khedri, and S. F. Ebrahimi, "The essence of thematic structures in the academic translated texts", *Journal of Education and Practice*, no. 1, vol. 3, pp. 37-43, 2012.
- [9] L. Potter, "Ideological representations and theme-rheme analysis in English and Arabic news reports: a systemic functional approach", *Functional Linguistics*, 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://functionallinguistics.springeropen.com/articles/10.1186/s40554-016-0028-y>. Дата звернення: Лют. 3, 2021.
- [10] Ye. Yu. Savchenko, "Correlation of theme-rheme structure with dictum and modus in English and Ukrainian speech", *Science and Education a New Dimension. Philology*, no. 4 (27), iss. 107, pp. 15-18, 2016.
- [11] Р. А. Латыпов, "Квантовый формализм как инструмент описания пространств состояний концептов и сочетаний концептов", *Филологические науки. Вопросы теории и практики*, № 4 (58), ч. 1, с. 120-127, 2016.
- [12] И. А. Герасимова, *Формальная грамматика и интенциональная логика*. Москва, Россия: ИФ РАН, 2000.
- [13] Я. В. Тарасенко, "Метод контент-аналізу семантичної частки в текстах з ознаками психолінгвістичного впливу", *Системи*

- управління, навігації та зв'язку, т. 6, № 58, с. 92-96, 2019.
- [14] Я. В. Тарасенко, "Визначення координат семантичної частки в англomовному тексті при відомому психолінгвістичному портреті пропагандиста", *Захист інформації*, т. 21, № 3, с. 168-174, 2019.
- [15] Ya. Tarasenko, "Content-criteria of psycholinguistic portrait's semantic category for researching the group propaganda", *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, vol. 26, no. 1, pp. 5-13, 2020.
- ### References
- [1] *Decree of the President of Ukraine, On the decision of the National Security and Defense Council of Ukraine on December 29, 2016 "About the Doctrine of information security of Ukraine"*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/47/2017#Text>. Accessed on: Jan. 21, 2021 [in Ukrainian].
- [2] Ya. Tarasenko, "The quantum-semantic psycholinguistic analysis method for the english-language text of propaganda discourse", *Advanced Information Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 62-68, 2019.
- [3] Ya. V. Tarasenko, "The method of English text's computerized formation in accordance with the propagandist's psycholinguistic portrait", *Zakhyst informatsii*, vol. 22, no. 2, pp. 66-73, 2020 [in Ukrainian].
- [4] B. Hale, "Essence and definition by abstraction", *Synthese*, 2018. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11229-018-1726-7>. Accessed on: Feb. 2, 2021.
- [5] D. Ceglarek, "Semantic compression for text document processing", *Transactions on Computational Collective Intelligence XIV*, vol. 13, pp. 20-49, 2014.
- [6] Ya. V. Tarasenko, O. B. Piven, and I. M. Fedotova-Piven, "Method of textual information semantic compression for counteracting computer linguistic steganography", *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy*, no. 3 (32), pp. 68-78, 2018 [in Ukrainian].
- [7] Ya. V. Tarasenko, and O. B. Piven, "Features of calculating the information entropy of the text in case of attacking the linguistic stegosystem by semantic compression", *Bezpeka informatsii*, vol. 24, iss. 2, pp. 124-129, 2018 [in Ukrainian].
- [8] M. Khedri, and S. F. Ebrahimi, "The essence of thematic structures in the academic translated texts", *Journal of Education and Practice*, no. 1, vol. 3, pp. 37-43, 2012.
- [9] L. Potter, "Ideological representations and theme-rheme analysis in English and Arabic news reports: a systemic functional approach", *Functional Linguistics*, 2016. [Online]. Available: <https://functionallinguistics.springeropen.com/articles/10.1186/s40554-016-0028-y>. Accessed on: Feb. 3, 2021.
- [10] Ye. Yu. Savchenko, "Correlation of theme-rheme structure with dictum and modus in English and Ukrainian speech", *Science and Education a New Dimension. Philology*, no. 4 (27), iss. 107, pp. 15-18, 2016.
- [11] R. A. Latypov, "Quantum formalism as a tool to describe the state spaces of concepts and concept combinations", *Filologicheskiye nauki. Voprosy teorii i praktiki*, no. 4 (58), part 1, pp. 120-127, 2016 [in Russian].
- [12] I. A. Gerasimova, *Formal Grammar and Intensional Logic*. Moscow: IF RAN, 2000 [in Russian].
- [13] Ya. V. Tarasenko, "The content analysis method of semantic particle in texts with psycholinguistic influence signs", *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, vol. 6, no. 58, pp. 92-96, 2019 [in Ukrainian].
- [14] Ya. V. Tarasenko, "Determining the coordinates of semantic particle in English text with a known psycholinguist portrait of propagandist", *Zakhyst informatsii*, vol. 21, no. 3, pp. 168-174, 2019 [in Ukrainian].
- [15] Ya. Tarasenko, "Content-criteria of psycholinguistic portrait's semantic category for researching the group propaganda", *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, vol. 26, no. 1, pp. 5-13, 2020.

Ya. V. Tarasenko, Ph.D.
e-mail: yaroslav.tarasenko93@gmail.com
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

**METHOD OF DETECTION AND PRESERVATION
OF INDIVISIBLE SEMANTIC COMPONENT OF ENGLISH MANIPULATIVE TEXT
OF PROPAGANDA DISCOURSE BASED ON QUANTUM FORMALISM**

The article studies the peculiarities of the use of quantum formalism in the problems of computer analysis and processing of manipulative texts. The developed method of detection and preservation of indivisible semantic component of the manipulative text of propaganda discourse makes it possible to increase the efficiency of detection and preservation of indivisible semantic component compared to semantic compression methods based on information entropy which leads to detecting and preserving the key individual semantic constructions inherent in the attacker's psycholinguistic portrait for further implementation of the reverse effect in them. The methods of quantum formalism and quantum-semantic research have been used to perform the tasks set in the article and to achieve the aim. The functioning of the system for determining the rheme of manipulative English text is modeled and the comparison with the results of the work of semantic compression systems is made, which proves the possibility of overcoming the semantic compression limit without losing semantics, which significantly reduces the resulting set of semantic categories and increases the efficiency of detecting the indivisible semantics components in comparison with the analogues by reducing the number of redundant and inaccurate semantic components.

Preliminary experimental data allow to assert the high efficiency of the developed method. The advantages and disadvantages of the developed method are outlined. The results described in the article will allow embedding the propagandist's individual semantic line into the text's indivisible semantic component in order to increase the effectiveness of the reverse hidden informational influence on the attacker.

Keywords: *theme definition, rheme definition, counteraction to propaganda, counteraction to manipulative texts, psycholinguistic portrait, quantum-semantic analysis.*

UDC 629.4.014

[0000-0002-1091-9075] **V. A. Tazetdinov**, *Ph.D., associate professor*,

e-mail: valeriy.tazetdinov@gmail.com

[0000-0002-0009-337X] **S. V. Sysoienko**, *Ph.D.*

e-mail: s.sysoienko@gmail.com

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

NEURAL NETWORK SYSTEM FOR SELECTION OF TABLE TENNIS EQUIPMENT

The article examines the optimization of search processes and the relevance of the use of artificial neural networks for the selection of table tennis equipment. With the help of neural networks, it is possible to solve any task. The problem is only to make the right choice of architecture and structure of the neural network, the algorithm of its operation and to formalize the source data, the result and the corresponding transformation. The problem of clustering the table tennis equipment market is considered.

The result of the research has become the creation of information-analytical system "Neuro TT" for the analysis of the table tennis equipment market and the possibility of selecting the optimal combination of rubbers and blade. The structure of such a neural network system has been developed. It consists of three information banks, which contain information about the properties of rubbers and blades, as well as known combinations of rubbers and blades.

The use of such a system will allow to forecast the development trends of the table tennis equipment market, manufacturers to plan and change the structure of production, buyers (players) and sellers to fully meet the information needs.

Keywords: neural network, optimization process, clustering, neural network system, algorithm.

Introduction. Current trends of table tennis equipment market are caused by a number of reasons. A fast development of innovation technologies and their usage in everyday life is an integral part of a modern society. An automation of a wide range of human activities is observed. At the same time, the interest in physical culture and mass sports is increasing, which leads to mass activity of the population and popularization of game sports and in particular table tennis. This sport for playing at a high level does not require complex organization and significant financial costs. Table tennis covers different age categories and is an excellent means of active recreation, strengthening the body and keeping it in constant tone. That is why table tennis is so popular in the world. This is particularly evident by the record number of countries participating in the World Table Tennis Championships (141 countries of which 80 are men's and 61 are women's teams). A prerequisite for a high level of training in this game is the correct selection of a combination of rubbers and a blade. It is also necessary to take into account the fact that the rubbers and the blade have their own properties that affect the game to one degree

or another. In addition, there is a problem of a successful combination of sports equipment and playing style of a table tennis player. Thus, the variety of table tennis equipment makes the selection of the right combination of rubbers and a blade quite a difficult choice for a player.

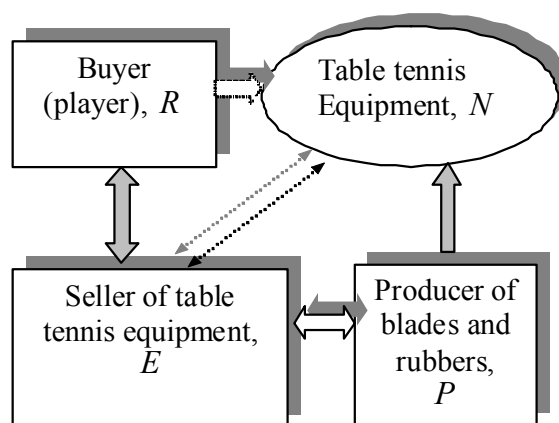


Figure 1 – The structure of the table tennis market

Table tennis market structure and its optimal management can be represented thus (figure 1 and figure 2).

Research problem statement. *The purpose of the research* is to develop a neural network system for the selection of the right combination of rubbers and a blade. It is necessary to develop a structure, principles of operation of such a neural network system. The

system being developed should offer the player several variations of rubbers combinations for the existing blade that would suit the player's style of play and requirements. Also system should help the player to choose the right blade and rubbers if necessary [1-2].

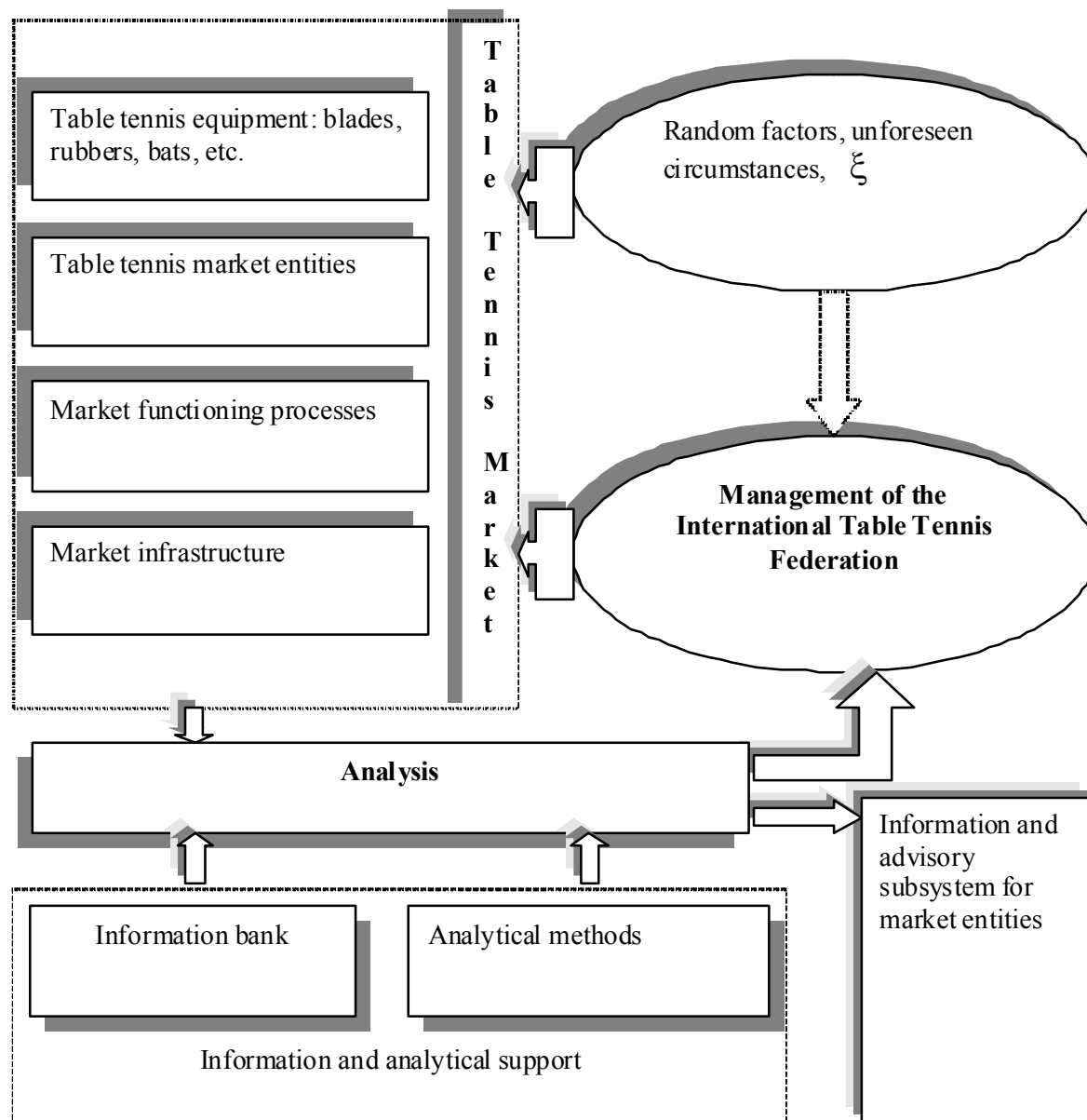


Figure 2 – Optimal management of the table tennis market

Developed by the authors

The neural network system needs to be filled with such content that would contribute to the competent formulation of the problem, the choice of the optimal strategy for its solution, would reflect the decision-making style in a given subject area, as well as the model of this

area itself. Thus, this intelligent system must have the properties of adaptation and self-organization. It will integrate the knowledge of a mathematician, a programmer and an expert on table tennis equipment. Its focus on a specific player, who has his own ideas on the

interpretation, assessment, processing and analysis of information, will significantly improve the quality of solutions, and the neural network system itself will become an intellectual partner of a person in solving the problem of choosing table tennis equipment.

The developed system should provide analytical services to the players and classify the rubbers and blades according to the given standards, determine the priority factors and the degree of their influence on the properties of the finished racket (the combination of rubbers and a blade).

To implement the developed neural network system, a client-server architecture is used, when the database is found on the server, and the software and analytical support on the workstation. Such an organization significantly reduces the time required for the selection of equipment for the player and its information support.

Analysis of recent research sources.

Analysis of literary sources indicates that most often tasks with the selection of table tennis equipment can be solved by such methods as: statistical analysis, search by analogy, search trees and soft computing.

Modern scientific developments of national and foreign scientists are focused on combining technical and sports areas to automate work and obtain high-quality results. Renowned table tennis coaches and experts R. V. Barchukova, V. M. Bogushchas, O. V. Matitsin argue that now it is possible to achieve significant results in the game by optimizing the selection of the equipment [4].

The inclusion of table tennis in the program of the Olympic Games in 2001 provoked a rapid growth in the sports arena and served as an impetus for the development of this sport. Table tennis is characterized as an analytical sport with a variety of playing techniques and many tactical patterns. A modern table tennis player must have a high general physical training and psychological one, which is no less important.

The use of neural networks in various fields is relevant, as evidenced by the emergence of a significant number of publications on this topic, in particular, a number of new publications can be found in the works of J. D. Cowan, C. Koch, G. C. Fox, J. G. Koller et al.

Analysis of a wide range of tasks, that are solved by the subjects of the table tennis market for market processes of both an objective and a subjective nature, indicates the need to create information services and analytical support.

Significant power of the set of initial data [3], their diversity, subjective nature of origin, taking into account the possibility of force majeure circumstances and the probability of their occurrence, determining the degree of response to minimize losses do not allow adequate analysis of information within traditional statistical and integro-differential methods.

One of the main features that must be taken into account when developing models and methods of analysis is the variety of factors and the high power of many of their values. Invariant to such features is modeling based on the use of neural networks, the result of which, although it will not be expressed in dependence in the analytical form, but will solve the problem of analysis and selection of table tennis equipment. Using an artificial neural network (ANN) for identification, the researcher is not limited by any conditions that are inherent in other analytical methods.

Artificial neural networks and algorithms for their functioning. The most acceptable in the selection of table tennis equipment can be statistical methods, which include correlation, regression, and factor analysis. Each of them is based on the calculation of average characteristics, which when modeling real practical situations, often give incorrect results. Using these methods, determine the existence of a linear relationship between factors, calculate the equation of multiple linear dependence (for table tennis equipment between parameter z which takes into account the speed, rotation and control and factors $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ that describe the properties of the bat):

$$z = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i, \quad (1)$$

where $a_i, i = \overline{0, n}$ – weights that determine the most important factors and the degree of influence of each of them on the resulting indicator and can be used to test the hypothesis of the impact of qualitative characteristics on quantitative ones.

A neural network with a traditional straight-line architecture with two layers of

weights looks like this [3]. The operation of an ANN with an inverse error propagation algorithm [5] is based on two technologies: the first one is designed to minimize the objective function and is based on gradient optimization methods [6]; the second one is also aimed at minimizing, but already components of the overall objective function in the opposite direction of signal propagation, and is based on the inverse propagation of the error. The target function for all networks is as follows:

$$E = E(W, \eta) = \frac{1}{kp} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^p (T_i^j - Y_i^j(W, \eta))^2, \quad (2)$$

where T_i^j is the tabular value of the i -th result characteristic for the j -th input image, $Y_i^j(W, \eta)$ is the calculated ANN value, W is the array of weights, η is the aggregate vector of other network and learning parameters.

The advantages of ANN with an inverse error propagation algorithm are that according to the method of the fastest descent, the target function decreases with each step and necessarily reaches its minimum, and the learning process is relatively fast. At the same time, the efficiency of ANN with an inverse error propagation algorithm, as well as any iterative algorithm, depends on the choice of the starting point (reference solution, which is the initial set of weights) and the step of finding a solution.

A representative of networks with a direct learning algorithm is an RBF network. The speed of training and absolute accuracy of identification at training points testify in its favor. The disadvantages are that in large-scale problems it is necessary to calculate inverse matrices, which are often poorly conditioned, and low accuracy of forecasting at points that do not belong to the internal field of study.

The Kohonen network (or one of its variants is the self-organized Kohonen map) is often used to solve clustering problems. As a result of learning the Kohonen network, a set of maps is built, each of which is a two-dimensional grid of nodes placed in multidimensional space. The task of its training is to adjust the activation coefficients so as to activate the same neuron for similar vectors at the input. The weights are adjusted by an iterative algorithm, in which various heuristic techniques are used for adequate

training, which allow to obtain a stable and sub-optimal solution with a minimum number of iterations.

As it has been found that the usage of the Kohonen neural network is the most appropriate way to solve the problem of table tennis equipment selection. The use of this neural network allows quickly to solve clustering problems and to find more accurate solutions in comparison with the options considered.

The task of clustering the table tennis equipment market. Important for the analysis of table tennis equipment market is the problem of general clustering, which is formulated as follows. Let $\Psi_i, i = \overline{1, m}$ table tennis bats, which are presented in the information bank. Each bat is characterized by a set of parameter values $(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i), i = \overline{1, m}$. A priori, the analyst specifies the number of clusters K . Usually $K \in \{3, 4, 5, 6, 7\}$. To form clusters, the initial data must be reduced to a dimensionless form. If in the further research it is not supposed to study bats with extreme values of parameters, that is, there is no such $\Psi_i, i > m$ and such $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ that $x_j^i \notin \Omega$, where Ω_j – set of values of the j -th factor, then the rationing formula is as follows:

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}. \quad (3)$$

If such a possibility is not excluded, the law of rationing may be one of the following:

$$X' = \frac{X - m}{\sigma}, X' = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad (4)$$

where m – mathematical expectation (in the calculations we replace it with the mean value), σ – standard deviation (in the calculations we use the selective standard deviation). It is possible that the normalization is performed using the composition of two transformations (4).

Without limiting the generality, we assume that $X_j \in \Omega_j = [0, 1], j = \overline{1, n}$. A cluster is a group of objects Ξ , such that the mean square of the intragroup distance to the center of the group

is less than the mean distance to the total center in the initial set of objects, i.e. $\bar{d}_{\Xi}^2 < \sigma^2$, where

$$\bar{d}_{\Xi}^2 = \frac{1}{N} \sum_{X_i \in \Xi} (X_i - \bar{X}_{\Xi})^2, \bar{X}_{\Xi} = \frac{1}{N} \sum_{X_i \in \Xi} X_i. \quad (5)$$

The task of clustering is to find a function $\phi(i)$ that determines the number class on the index and minimizes the sum of proximity measures:

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ j>i}}^m \|\Psi_i^{\phi(i)} - \Psi_j^{\phi(j)}\| \quad (6)$$

given that

$$\sum_{v=1}^K \sum_{i=1}^{m_v} \chi(\Psi_i \in v\text{-th cluster}) = m, \quad (7)$$

where m_v is the number of bats in the v -th

$$\text{cluster, } \chi(R) = \begin{cases} 1, & \text{if } R \text{ is true,} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}.$$

The structure and construction features of the neural network system. Wide implementation and definition of the advantages of data mining technologies [7], [8] knowledge discovery in databases (KDD) [9], OLAP gives all grounds for the use of ANN.

Functional load of the neural network system «NEURO TT», divided into several fragments, which are determined by the entity working with the system (figure 3). The information base is made by an information bank, which is three-component and includes a supply bank (IB1), a demand bank (IB2) and a bank that contains background information (IB3).

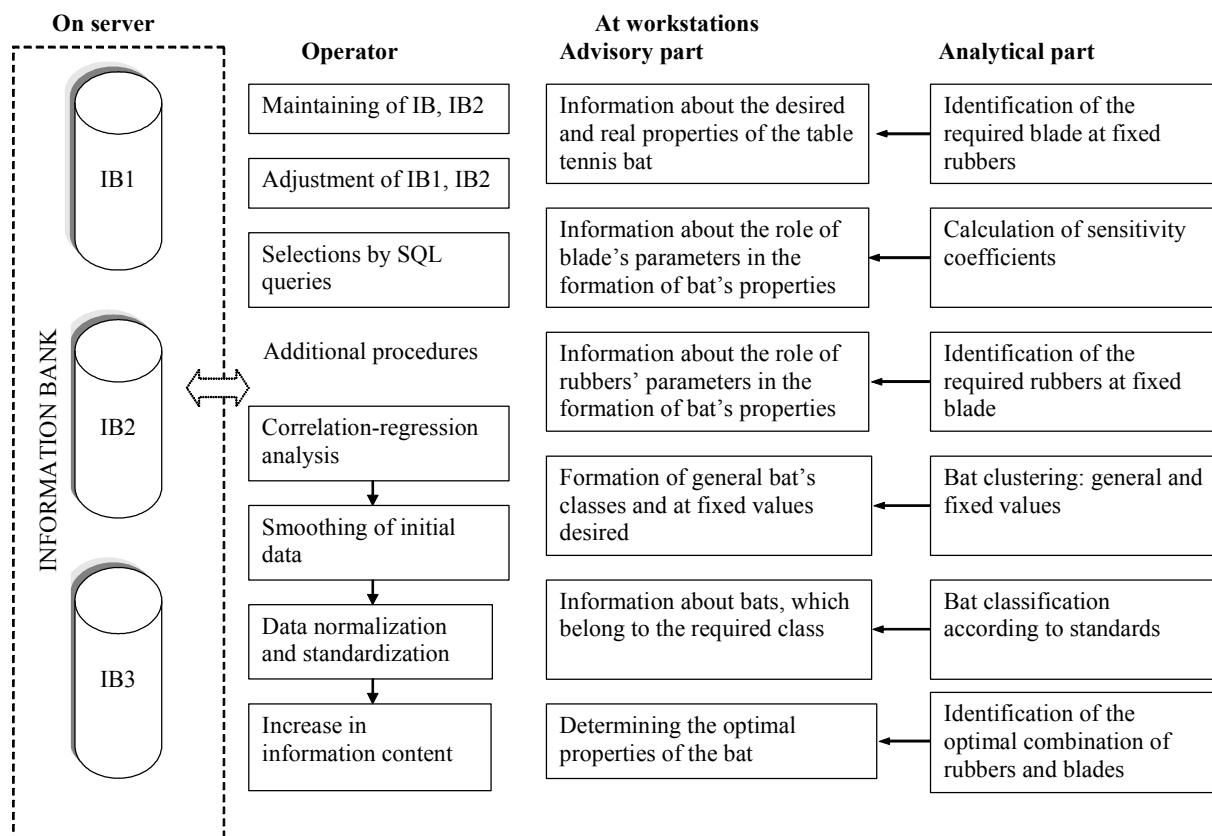


Figure 3 – Structural scheme of the neural network system "NEURO TT"

All components are located on the server and are informationally independent of each other. Data entry and correction are performed by the operator. If necessary, the operator can obtain the necessary information from the tables of the information bank using SQL-queries.

The initial data of the research will be known as the content of two information banks, the first of which contains information about the existing bats, which can be obtained from three sources [10-12], the second – information about the desired object of purchase. The difference

between IB1 and IB2 is that it contains unambiguous information, and certain fields contain data represented by membership functions [13] or intervals.

As is known, a fuzzy set $\tilde{A}$ on a universal set U is a set of pairs $(u, \mu_A(u))$, where $\mu_A(u)$ is a measure of the element $u \in U$ belonging to a fuzzy set $\tilde{A}$. The membership function is a function that allows to calculate the degree of belonging of an arbitrary element from a universal set to a fuzzy set.

The values of the information bank fields have different formats: symbolic, numeric, integer, boolean, dates. Procedures for bringing them to a form adapted for analysis using computer technology, are developed in [14], [15]. The information that comes directly to the input of the computational algorithm is numerical.

Discussion of research results. Summarizing the above, we note that the algorithm of search, selection according to certain criteria of table tennis equipment and the process of processing the obtained source data in an environment of great diversity of information occupies an important place in modern society. This is due to the fact that previously known search methods on the Internet are becoming less effective due to the rapid increase in the number of information platforms. The process of automation of search engines allows you to faster and more efficiently perform search queries according to certain criteria.

The developed neural network system "NeuroTT" allows you to more effectively perform search queries on certain criteria of compliance and take into account current changes in the information society. As a result of research and comparison with existing similar systems, it becomes clear that the development and use of effective search engines like NeuroTT, focused on the needs of users of a particular professional environment is of considerable scientific interest.

Conclusions. Thus, neural network systems form a new high-tech direction in the development of most branches of science and are fundamental in practical use. The current state of the table tennis market and the almost complete absence of methods of analysis for the selection of equipment indicate the need for the development of information and analytical systems.

The developed "Neuro TT" system will allow for a player to obtain all the necessary information support. "Neuro TT" will integrate the knowledge of a mathematician, a programmer and an expert on table tennis equipment. It's focused on a specific player, who has his own ideas on the interpretation, assessment, processing and analysis of information.

Such systems will operate on a single information base of table tennis equipment, allowing to forecast the market of equipment trends and prospects, manufacturers to plan and change the structure of production, as well as sellers and buyers to fully meet the information needs.

Prospects for further research of optimization processes in the selection of equipment for table tennis is the development of the theory of artificial neural networks and the practical implementation of existing methods.

References

- [1] V. A. Tazetdinov, "Automation of the process of selection of equipment for table tennis using neural network systems", *Komputerno-intergrovani tekhnologii: osvita, nauka, vyrobnytvo: sci. journ.*, no 32, pp. 81-84, 2018 [in Ukrainian].
- [2] V. A. Tazetdinov, "Optimization of the process of selection of equipment for table tennis based on the construction of neural networks by the criteria of conformity", *Naukovi Notatky: int. coll.*, no 63, pp. 209-213, 2018 [in Ukrainian].
- [3] A. N. Gorban, *Neural network training*. Moscow, Russia: ParaGraf, 1990 [in Russian].
- [4] V. I. Landyk, *Sports training methodology: table tennis*. Donetsk, Ukraine: NordPress, 2005 [in Russian].
- [5] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams, "Learning representations by back-propagating errors", *Nature* (London), no. 323, pp. 533-536, 1986.
- [6] B. Bundy, *Optimization methods*. Moscow, Russia: Radio i svyaz, 1988 [in Russian].
- [7] M. Kiselev, and E. Solomatin, "Means of knowledge extraction in business and finance", *Otkrytiye Sistemi*, no. 4, pp. 41-44, 1997 [in Russian].
- [8] M. Shapot, "Data mining in decision support systems", *Otkrytiye Sistemi*, no 1, pp. 30-35, 1998 [in Russian].

- [9] M. M. Hlybovets, and O. V. Oletsky, *Artificial intelligence*. Kyiv, Ukraine: Academiya, 2002 [in Ukrainian].
- [10] *Rubber Reviews*. [Online]. Available: <https://revspin.net/rubber/>. Accessed on: Jan. 28, 2021.
- [11] *Blade Reviews*. [Online]. Available: <https://revspin.net/blade/>. Accessed on: Jan. 28, 2021.
- [12] *The database of table tennis blades compositions*. [Online]. Available: <https://stervinou.net/ttddb/index.php/>. Accessed on: Jan. 28, 2021.
- [13] D. Dubois, and A. Prad, *Theory of possibilities*. Moscow, Russia: Radio i svyaz, 1990 [in Russian].
- [14] A. A. Yezhov, and S. A. Shumsky, *Neuro-computing and its applications in economics and business*. Moscow, Russia: MIFI, 1998 [in Russian].
- [15] O. P. Kutakh, "Research of dynamic situations and determination of their characteristics at different stages of the decision-making process", *Systemni doslidzhennya ta informatsiyni tekhnolohiyi*, no. 4, pp. 60-72, 2003 [in Ukrainian].

В. А. Тазетдінов, к.т.н., доцент,
e-mail: valeriy.tazetdinov@gmail.com

С. В. Сисоєнко, к.т.н.
e-mail: s.sysoienko@gmail.com

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

НЕЙРОМЕРЕЖЕВА СИСТЕМА ПІДБОРУ ІНВЕНТАРЯ ДЛЯ НАСТІЛЬНОГО ТЕНІСУ

У статті досліджується питання оптимізації пошукових процесів та актуальність використання штучних нейронних мереж для підбору інвентаря для настільного тенісу. Проводиться аналіз останніх публікацій в обраній темі та розглядаються переваги штучних нейронних мереж порівняно з традиційними видами знаходження рішень. Визначаються переваги використання комп'ютерних технологій з метою автоматизації процесів підбору інвентаря для настільного тенісу.

За допомогою нейронних мереж можна розв'язати будь-яку задачу. Проблема полягає лише у тому, щоб здійснити правильний вибір архітектури та структури нейронної мережі, алгоритму її функціонування та здійснити формалізацію вихідних даних, результату та відповідного перетворення. В роботі розглядаються варіанти різних побудов штучних нейронних мереж і алгоритми їх функціонування з метою вибору оптимального алгоритму. Аналіуються недоліки та переваги мереж з алгоритмом оберненого поширення похибки, RBF (штучних нейронних мереж із радіально-базисними активаційними функціями) та карти Кохонена. В статті також розглянуто задачу кластеризації ринку інвентаря для настільного тенісу.

Результатом дослідження стало створення нейромережевої інформаційно-аналітичної системи «Neuro TT» для аналізу ринку інвентаря настільного тенісу з можливістю підбору оптимального поєднання накладок і основ.

Розроблено структуру такої нейромережевої системи. Вона складається з трьох інформаційних банків, в яких міститься інформація про властивості основ і накладок, а також відомі комбінації таких поєднань накладок і основ. Елементи системи розташовуються на сервері і є незалежними один від одного.

Використання такої системи дасть змогу передбачати тенденції розвитку ринку інвентаря для настільного тенісу, виробникам планувати та змінювати структуру виробництва, покупцям (гравцям) та продавцям повністю задовольнити інформаційні потреби.

Ключові слова: нейронна мережа, процес оптимізації, кластеризація, нейромережева система, алгоритм.

[0000-0002-6927-8663] **С. И. Пильтай**¹, к.т.н., доцент,

e-mail: s.piltai@kpi.ua

[0000-0002-4987-4978] **А. В. Булашенко**¹, ст. преподаватель,

e-mail: a.bulashenko@kpi.ua

[0000-0003-3895-8807] **И. В. Фесюк**¹, студентка,

e-mail: irinkafes255@gmail.com

[0000-0002-56486658] **А. В. Булашенко**², студент

e-mail: alex.bulashenko2020@gmail.com

¹Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина

²Шосткинский профессиональный колледж имени Ивана Кожедуба
Сумского государственного университета
ул. Институтская, 1, г. Шостка, Сумская обл., 41100, Украина

КОМПАКТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДЛЯ СПУТНИКОВЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМ

В статье приведена методика разработки и оптимизации поляризационного устройства на основе квадратного волновода. Внутренняя структура предложенного устройства поляризации состоит из реактивных элементов в виде трех диафрагм на основе квадратного волновода. Было выполнено оптимизацию поляризатора для его применения в рабочем диапазоне частот от 13,0 ГГц до 14,4 ГГц. Сконструированный поляризатор на основе квадратного волновода поддерживает дифференциальный фазовый сдвиг $90^\circ \pm 4,4^\circ$, коэффициент стоячей волны по напряжению менее 2,04, коэффициент эллиптичности менее 0,6 дБ, кроссполяризационную развязку выше 29,5 дБ. В результате разработанное устройство преобразования поляризации обеспечивает достаточно хорошие электромагнитные характеристики в рабочем К-диапазоне частот 13,0–14,4 ГГц.

Ключевые слова: поляризатор, волноводный поляризатор, диафрагма, волновод, дифференциальный фазовый сдвиг, коэффициент эллиптичности, кроссполяризационная развязка.

Введение. Широкое распространение сегодня получили беспроводные мобильные и спутниковые системы связи. Они все чаще используют новые технологии для увеличения емкости каналов связи, что дает возможность повторно использовать частотные ресурсы [1]. В системах связи 5G для увеличения информационной емкости систем используются технологии D2D, M2M, OFDM и технологии пространственного разнесения [2–8].

Поляризационная обработка сигналов применяется для повторного использования частотного ресурса в спутниковых системах. Применение сигналов с круговой поляризацией уменьшает эффект замирания и устраняет интерференционные помехи сигналов, которые появляются за счет многолучевого распространения. Для каждого отражения сигнала, что отражаются от поверхности Земли или от других объектов, изменяют свою поляризацию на ортогональную. В результате уро-

вень искажений сигналов с непарным числом отражений в приемные антенны будет несущественным. В случае использования ортогональных поляризаций информационная емкость беспроводного канала связи в два раза увеличивается.

Тип поляризации электромагнитной волны имеет важное влияние на особенности процесса ее распространения в беспроводном канале связи. Поляризационная обработка сигналов используется в антенных системах. Такие системы дают возможность передавать и принимать одновременно сигналы с разными типами поляризации. Базовым элементом таких систем являются устройства обработки поляризации. Характеристики поляризаторов оказывают существенное влияние на работу всей системы. Таким образом, разработка и оптимизация характеристик новых волноводных поляризаторов для излучателей спутниковых антенн является

важным инженерным заданием, что решается в предложенной статье.

Цель исследования – разработка нового волноводного поляризатора с диафрагмами и оптимизация его электромагнитных характеристик для спутникового диапазона частот 13,0–14,4 ГГц.

Анализ последних исследований. Поляризаторы с перегородками являются одним из распространенных типов волноводных поляризаторов [9–10]. Главным преимуществом таких поляризаторов является компактная конструкция, которая объединяет ортомодовый преобразователь и поляризатор, а главным недостатком – узкая полоса пропускания, которая ограничивает сферу его использования в современных системах спутниковой связи. В [9] получено, что относительная ширина полосы пропускания устройства может достигнуть лишь 20 % при условии, что система питания антенн должна обеспечить одновременно изоляцию более 25 дБ и кроссполяризационную изоляцию больше 30 дБ.

Альтернативные конструкции поляризаторов – конструкции с реактивными элементами в виде диафрагм [11–25]. Причинами являются более широкая полоса пропускания и лучшие электромагнитные характеристики таких устройств. В антенных системах двойной поляризации вместе с волноводными поляризаторами используют ортомодовый преобразователь [11]. Более того, архитектура поляризационного устройства с диафрагмами имеет осевую симметрию и две зеркальные плоскости симметрии. Эта особенность позволяет улучшить качество поляризации и дает возможность конструировать такие поляризаторы с помощью фрезерования на станках с числовым управлением.

В работах [12, 13] даны результаты разработки компактных волноводных поляризаторов с двухгранной симметрией. В конструкции содержатся резонансные диафрагмы с прорезями. Для определения наилучших электромагнитных характеристик применяется многопараметрическая оптимизация в различных частотных диапазонах.

Аналитический метод анализа фазовых, согласующих и поляризационных характеристик волноводных поляризаторов с диафрагмами был предложен в работе [14]. Предложенная методика базируется на основе микроволновых матриц рассеивания и пере-

дачи. Для проверки представленного метода на их основе был разработан поляризатор с двумя диафрагмами на основе квадратного волновода. Для этого устройства в рабочем диапазоне частот от 7,4 ГГц до 8,5 ГГц были получены электромагнитные характеристики. Его дифференциальный фазовый сдвиг изменяется в пределах $90^\circ \pm 8^\circ$. Максимальное значение коэффициента эллиптичности составляет 1,6 дБ, а минимальное значение кроссполяризационной развязки – 21,5 дБ. В научных статьях [15–18] были разработаны поляризационные устройства на основе квадратного волновода с разным количеством диафрагм. Наилучшие характеристики обеспечил поляризатор с пятью диафрагмами в рабочем Ку-диапазоне частот. В статье [19] показана возможность использования «оптической активности», которая возникает при взаимодействии полей на связанных диафрагмах. Такая конструкция позволяет изменять положение плоскости поляризации за счет изменения положения диафрагм. Параметрический метод синтеза волноводных поляризаторов с диафрагмами был представлен в [20]. Разработанный метод синтеза был верифицирован в рабочем С-диапазоне частот 3,4–4,2 ГГц. Предложенный преобразователь поляризации поддерживает дифференциальный фазовый сдвиг $90^\circ \pm 4,0^\circ$. Максимальное значение коэффициента эллиптичности принимает значение 1,6 дБ, а минимальное значение уровня кроссполяризационной развязки – 28 дБ.

Авторы статьи [21] предложили новую методику расчета перестраиваемых волноводных поляризаторов со штырями. Разработанная методика использует теорию волновых матриц рассеивания и передачи. Для проверки корректности предложенной модели был разработан поляризатор с тремя штырями на основе квадратного волновода [22]. В рабочем диапазоне частот 8,0–8,5 ГГц устройство поддерживает дифференциальный фазовый сдвиг $90^\circ \pm 5,4^\circ$. При этом коэффициент стоячей волны по напряжению не превышает 1,3. Максимальное значение кроссполяризационной развязки составляет 26,5 дБ. В [23] был разработан волноводный поляризатор с тремя штырями в диапазоне частот 7,7–8,5 ГГц. В предложенном устройстве диапазон изменения дифференциального фазового сдвига составляет $90^\circ \pm 2,2^\circ$. Кроме того, макси-

мальное значение коэффициента эллиптичности составляет 0,4 дБ, а минимальное значение кроссполяризационной развязки излучения – 29 дБ.

Метод расчета волноводных поляризаторов с диафрагмами и штырями был разработан в [24]. Предложенный метод может широко применяться для разработки новых перестраиваемых волноводных фильтров, фазосдвигателей и устройств обработки поляризации. Разработанные секции волновода можно настраивать благодаря изменению длины штырей. В результате были сконструированы две волноводные секции, которые обеспечивали следующие дифференциальные фазовые сдвиги: $30^\circ \pm 0,7^\circ$ и $45^\circ \pm 1,75^\circ$. В [25] на их основе были разработаны настраиваемые поляризаторы на основе квадратного волновода. Представленные устройства преобразования поляризации в рабочем X-диапазоне частот поддерживают следующие электромагнитные характеристики. Дифференциальный фазовый сдвиг поддерживается в пределах $90^\circ \pm 3,25^\circ$. Максимальный уровень коэффициента эллиптичности составляет 0,5 дБ, а минимальный уровень кроссполяризационного излучения – 31 дБ. Недостатком предложенных поляризационных устройств являются большие габариты и сложность конструкции.

Более того, рассмотренные методы разработки поляризаторов также широко применяются для анализа различных фильтров и фазосдвигающих устройств СВЧ [26–27].

Волновод с осевой симметрией имеет лучшую симметрию структуры и меньшие поляризационные искажения. Примером таких структур являются волноводы с четырьмя ребрами [28]. Коаксиальные и ортомодовые преобразователи [29–31] основаны на таких структурах. В [29] дана конструкция ортомодового преобразователя с четырьмя ребрами для С-диапазона. Архитектура состоит из двух наборов одинаковых ортогональных ребер, которые находятся в круглом волноводе. Представленное устройство поддерживает обратные потери не более -15 дБ при кроссполяризационном излучении -40 дБ в рабочей полосе частот 4,0–8,5 ГГц. Конструкция устройства поляризации с двумя диагональными гребнями и выходной диафрагмой на основе отрезка квадратного волновода представлена в [31]. Устройство поддерживает полосу про-

пускания 13 %. Максимальный уровень коэффициента эллиптичности составляет 1 дБ, а минимальное значение уровня кроссполяризационного излучения – 27 дБ. В [32] представлен численный алгоритм анализа и оптимизации поляризационных устройств с большой полосой пропускания. Такие поляризаторы состоят из симметрично расположенных прямоугольных гребней в коаксиальном волноводе. Был предложен метод поэтапного приближения. В результате были определены факторы, что влияют на точность расчетов. Математическая модель секторальных коаксиально-ребристых волноводов предложена в [33]. Такие устройства применяются в двухдиапазонных устройствах обработки поляризации. В [34] были получены математические модели с помощью метода интегральных уравнений. Анализ характеристик собственных волн коаксиальных волноводов с четырьмя ребрами осуществлен в работах [35–37]. В результате были разработаны двухдиапазонные коаксиальные ортомодовые преобразователи. В [37] была представлена конструкция системы питания антенн на основе цилиндрического волновода. Разработанная система имеет встроенную структуру устройства преобразования поляризации, которая обеспечивает симметричную схему излучения круговой поляризации. Конструкция состоит из девяти пар каналов, которые обеспечивают формирование поляризованных волн. Рассмотренная система питания антенны поддерживает максимальное значение коэффициента эллиптичности 1,2 дБ в рабочем диапазоне частот 79,5–88 ГГц. Ключевым недостатком предложенного устройства является сложность изготовления.

Поэтому целью статьи является разработка нового простого поляризатора с диафрагмами на основе квадратного волновода и оптимизация его электромагнитных характеристик для телекоммуникационных систем диапазона частот 13,0–14,4 ГГц.

Модель поляризатора. Трехмерная модель поляризатора с тремя диафрагмами на основе квадратного волновода представлена на рисунке 1. Тут представлены обозначения всех размеров конструкции. Две внутренние диафрагмы имеют одинаковую высоту h_1 . Они должны быть ниже центральной диафрагмы, что имеет высоту h_2 . Толщина всех диафрагм составляет w , а расстояние между ними – L_1 .

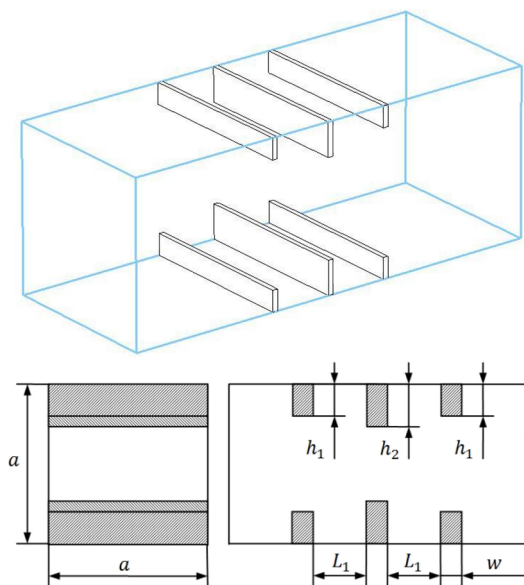


Рисунок 1 – Трехмерная модель квадратного волноводного поляризатора с тремя диафрагмами

С помощью метода эквивалентных цепей СВЧ [38, 39] и метода волновых матриц рассеивания и передачи [20] были рассчитаны элементы матрицы рассеивания разработанного устройства. Основные электромагнитные характеристики были выражены через элементы этой матрицы.

Базовыми электромагнитными характеристиками являются фазовая, согласующая и поляризационные характеристики. Среди них необходимо выделить дифференциальный фазовый сдвиг, максимальный уровень коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) для вертикальной и горизонтальной поляризаций, максимальный уровень коэффициента эллиптичности, минимальный уровень кроссполяризационной развязки (КПР).

На выходе устройства поляризации дифференциальный фазовый сдвиг определяется выражением

$$\Delta\varphi = \arg(S_{21\Sigma L}) - \arg(S_{21\Sigma C}), \quad (1)$$

где $S_{21\Sigma L}$ и $S_{21\Sigma C}$ – элементы общей матрицы рассеивания для индуктивной и емкостной диафрагм соответственно.

Аналитическое выражение для расчета КСВН имеет следующий вид:

$$КСВН = \frac{1 + |S_{\Sigma 11}|}{1 - |S_{\Sigma 11}|}. \quad (2)$$

Математическое выражение для коэффициента эллиптичности будет следующим:

$$k = 10 \lg \frac{A^2 + B^2 + \sqrt{A^4 + B^4 + 2A^2B^2 \cos(2\Delta\varphi)}}{A^2 + B^2 - \sqrt{A^4 + B^4 + 2A^2B^2 \cos(2\Delta\varphi)}},$$

где $A = |S_{21\Sigma L}|$, $B = |S_{21\Sigma C}|$.

Математическая формула для расчета КПР примет следующий вид:

$$КПР = 20 \lg \left(\frac{10^{0,05k} + 1}{10^{0,05k} - 1} \right). \quad (3)$$

На первом этапе процесса оптимизации поляризационного устройства начальные значения геометрических размеров определяем по методике [39]. Поскольку разрабатываемое устройство должно работать в рабочем диапазоне частот 13,0–14,4 ГГц, то размер стенки квадратного волновода будет в диапазоне от 14 мм до 29 мм. Центральной частотой диапазона является 11,75 ГГц. На этой частоте длина волны в волноводе рассчитывается по формуле

$$\lambda_B = \frac{c/f_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{c/f_0}{2a}\right)^2}}. \quad (4)$$

Начальное значение расстояния между диафрагмами определяется выражением

$$L = \frac{\lambda_B}{4}. \quad (5)$$

Размер окна диафрагмы определяется выражением

$$d = a - 2h. \quad (6)$$

Начальное значение высот диафрагм определяется из соотношения

$$h = (0.1 \div 0.3) \cdot a. \quad (7)$$

Процесс оптимизации осуществляется по следующей методике [40]. На начальном этапе благодаря изменению размера стенки волновода достигаем значения производной дифференциальной фазы по частоте, равной нулю. Потом за счет изменения высот диафрагм достигаем, чтобы значение дифференциального фазового сдвига было как можно ближе к 90°. Затем благодаря изменению расстояния между диафрагмами добиваемся, чтобы был минимальный уровень КСВН вертикальной и горизонтальной поляризаций.

Результаты оптимизации. Будем использовать метод волновых матриц рассеивания и метод эквивалентных микроволновых схем для моделирования и оптимизации электромагнитных характеристик поляризаторов

на основе квадратного волновода с тремя диафрагмами. В разделе представлены результаты численного моделирования предложенного метода.

Для проверки правильности полученных результатов сравним электромагнитные характеристики, которые были получены предложенным методом, с теми же характеристиками, полученными методом конечного интегрирования во временной области и методом конечных элементов [41].

На рисунке 2 представлена зависимость дифференциального фазового сдвига оптимизированного поляризатора от частоты в Кд диапазоне для трех методов. Подчеркнем, что дифференциальный фазовый сдвиг принимает значение $90^\circ \pm 4^\circ$, $90^\circ \pm 5^\circ$ и $90^\circ \pm 3^\circ$ для предложенного метода, метода конечного интегрирования и метода конечных элементов во всем рабочем диапазоне частот соответственно.

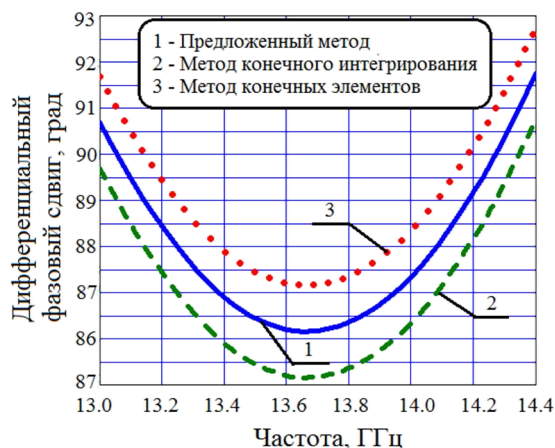


Рисунок 2 – Зависимость дифференциального фазового сдвига от частоты

Стоит отметить, что все три метода дают одинаковый результат с небольшими отклонениями. Подчеркнем, что на частотах 13,12 ГГц и 14,25 ГГц, 14,3 ГГц, 13,17 ГГц и 14,2 ГГц дифференциальный фазовый сдвиг равен 90° для трех предложенных методов соответственно. В рабочем диапазоне 13,0–14,4 ГГц дифференциальный фазовый сдвиг поляризатора изменяется от $85,0^\circ$ до $90,5^\circ$, от $86,0^\circ$ до $91,6^\circ$ и от $87,0^\circ$ до $93,0^\circ$. На частоте 11,36 ГГц можно увидеть максимальное отклонение дифференциального фазового сдвига от 90° на величины 4° , 3° и 5° для трех методов соответственно.

На рисунке 3 представлена зависимость КСВН оптимизированного поляризационного устройства от частоты для горизонтальной поляризации в рабочем диапазоне 13,0–

14,4 ГГц для трех методов. Стоит отметить, что максимальное значение КСВН достигается на частоте 13,0 ГГц. При этом максимальный уровень КСВН принимает значения 2,04, 1,95, 2,2 для предложенного метода, метода конечного интегрирования и метода конечных элементов во всем рабочем диапазоне частот соответственно.

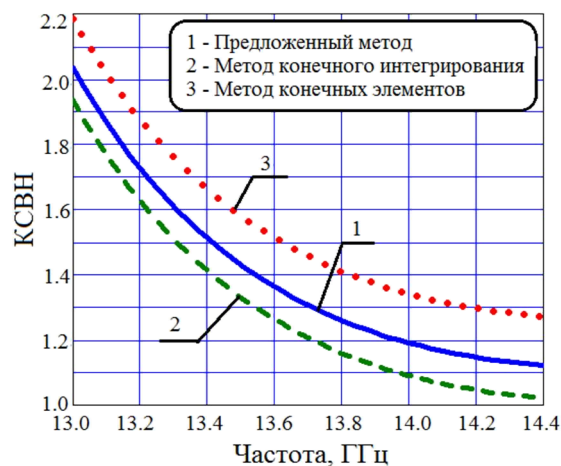


Рисунок 3 – Зависимость КСВН от частоты для горизонтальной поляризации

На рисунке 4 представлена зависимость КСВН оптимизированного поляризационного устройства от частоты для вертикальной поляризации в рабочем диапазоне 13,0–14,4 ГГц для трех методов. Отметим, что максимальное значение КСВН достигается на частоте 13,0 ГГц. При этом максимальный уровень КСВН принимает значения 1,96, 2,06, 2,1 для предложенного метода, метода конечного интегрирования и метода конечных элементов во всем рабочем диапазоне частот соответственно.

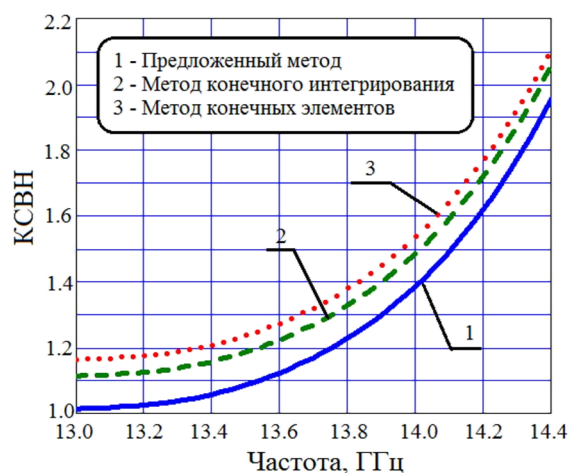


Рисунок 4 – Зависимость КСВН от частоты для вертикальной поляризации

Таким образом, для обеих поляризаций максимальные значения КСВН определяем по наибольшим значениям для вертикальной и горизонтальной поляризаций. При этом максимальный уровень КСВН принимает значения 2,04, 2,06, 2,2 для предложенного метода, метода конечного интегрирования и метода конечных элементов во всем рабочем диапазоне частот соответственно.

На рисунке 5 представлена зависимость коэффициента эллиптичности от частоты оптимизированного поляризатора для предложенного метода, метода конечного интегрирования и метода конечных элементов во всем рабочем диапазоне частот соответственно.

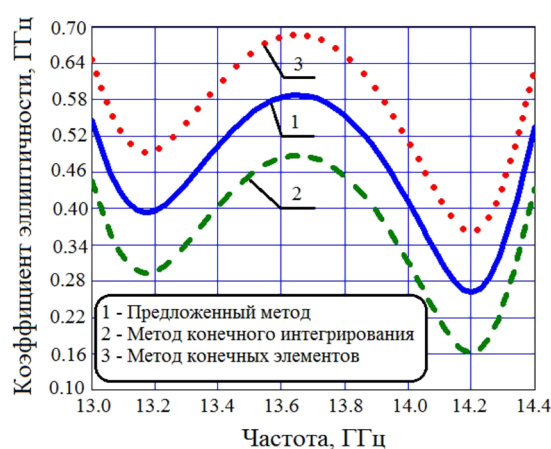


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента эллиптичности от частоты

Отметим, что в диапазоне частот от 13,0 ГГц до 14,4 ГГц коэффициент эллиптичности разработанного поляризационного устройства принимает такие пиковые значения: 0,6 дБ, 0,5 дБ, 0,7 дБ для предложенного метода, метода конечного интегрирования и метода конечных элементов соответственно.

Зависимость кроссполяризационной развязки от частоты для разработанного устройства преобразования поляризации представлена на рисунке 6 для предложенного метода, метода конечного интегрирования и метода конечных элементов во всем рабочем диапазоне частот соответственно.

Подчеркнем, что в диапазоне частот от 13,0 ГГц до 14,4 ГГц минимальное значение кроссполяризационной развязки разработанного поляризационного устройства соответствует таким значениям: 29,5 дБ, 30,5 дБ, 27,4 дБ для предложенного метода, метода конечного интегрирования и метода конечных элементов соответственно.

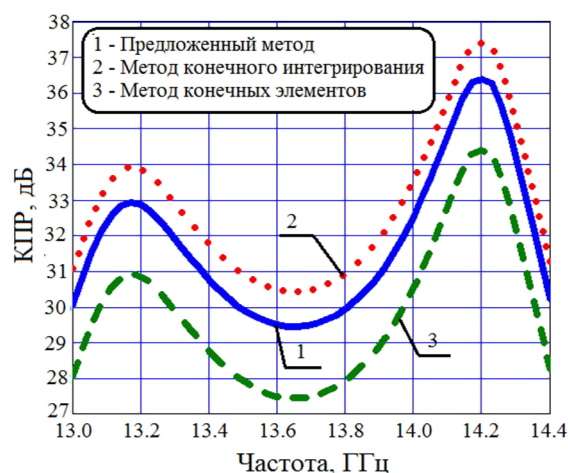


Рисунок 6 – Зависимость КПР от частоты для поляризатора с четырьмя диафрагмами

В результате в диапазоне частот от 13,0 ГГц до 14,4 ГГц разработанное устройство поляризации с тремя диафрагмами поддерживает следующие необходимые характеристики. Дифференциальный фазовый сдвиг находится в диапазоне $90^\circ \pm 4,0^\circ$. При этом максимальный уровень КСВН для вертикальной и горизонтальной поляризаций составляет 2,04. Пиковое значение коэффициента эллиптичности составляет 0,6 дБ, а минимальное значение КПР будет 29,5 дБ.

Результаты исследования и их обсуждение. Все геометрические размеры разработанного устройства обработки поляризации с тремя диафрагмами поляризатора сведены в таблицу для рабочего диапазона частот 13,0–14,4 ГГц (таблица 1).

Таблица 1 – Геометрические размеры разработанного поляризационного устройства

Размер	Значение
Величина стенки квадратного волновода	21,4 мм
Высота средней диафрагмы	3,82 мм
Высота крайних диафрагм	2,39 мм
Расстояние между диафрагмами	4,87 мм
Толщина всех диафрагм	2,75 мм

Для полученных размеров разработанного поляризационного устройства были получены базовые электромагнитные характеристики в диапазоне частот 13,0–14,4 ГГц с помощью предложенного метода, метода конечного интегрирования и метода конечных элементов соответственно, которые представлены в таблицах 2–4.

Таблица 2 – Электромагнитные характеристики устройства преобразования поляризации, полученные предложенным методом

Характеристика	Значение
Дифференциальный фазовый сдвиг	$90^\circ \pm 4,0^\circ$
Максимальный КСВН	2,04
Коэффициент эллиптичности	0,6 дБ
Минимальная КПР	29,5 дБ

Таблица 3 – Электромагнитные характеристики устройства преобразования поляризации, полученные методом конечного интегрирования

Характеристика	Значение
Дифференциальный фазовый сдвиг	$90^\circ \pm 3,0^\circ$
Максимальный КСВН	2,06
Коэффициент эллиптичности	0,5 дБ
Минимальная КПР	30,5 дБ

Таблица 4 – Электромагнитные характеристики устройства преобразования поляризации, полученные методом конечных элементов

Характеристика	Значение
Дифференциальный фазовый сдвиг	$90^\circ \pm 5,0^\circ$
Максимальный КСВН	2,2
Коэффициент эллиптичности	0,7 дБ
Минимальная КПР	27,4 дБ

Из таблиц 2–4 видно, что разработанное устройство преобразования поляризации с тремя диафрагмами обеспечивает удовлетворительное согласование в телекоммуникационных системах. Отметим, что разница в максимальном отклонении значения дифференциального фазового сдвига для всех методов не превышает 1° . Кроме того, значение КСВН, которое получено тремя методами, не отличается больше, чем на 1,4, а разница между максимальными значениями коэффициента эллиптичности составляет 0,1 дБ. Поэтому, сконструированный преобразователь поляризации с тремя диафрагмами поддерживает удовлетворительное согласование, хорошие фазовые и поляризационные характеристики во всем рабочем диапазоне частот.

Выводы. В статье предложена методика оптимизации поляризационных устройств с диафрагмами. С помощью этой методики было создано устройство обработки поляри-

зации с тремя диафрагмами для спутниковых антенных систем в диапазоне частот 13,0–14,4 ГГц.

Представленное устройство поддерживает следующие электромагнитные характеристики. Поляризатор обеспечивает дифференциальный фазовый сдвиг $90^\circ \pm 3,5^\circ$. При этом пиковое значение коэффициента стоячей волны по напряжению составляет 2,04. Максимальный уровень коэффициента эллиптичности составляет 0,6 дБ, а минимальный уровень КПР – 29,5 дБ. Более того, результаты расчетов были проведены с помощью метода конечного интегрирования и метода конечных элементов, которые хорошо согласуются с разработанным методом.

Список использованных источников

- [1] W. L. Stutzman, *Polarization in electromagnetic systems*. Artech House, Norwood, 2018.
- [2] A. Bulashenko, S. Pilyay, A. Polishuk, and O. Bulashenko, "New traffic model of M2M technology in 5G wireless sensor networks", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*, Kyiv, 2020, pp. 125-131. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349305.
- [3] A. V. Bulashenko, S. I. Pilyay, and I. V. Demchenko, "Energy efficiency of the D2D direct connection system in 5G network", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*, Kharkiv, 2020, pp. 324-329.
- [4] S. I. Pilyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Wireless sensor networks connectivity in heterogeneous 5G mobile systems", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*, Kharkiv, 2020, pp. 508-513.
- [5] A. B. Булашенко, "Оцінка зв'язності D2D комунікацій у мережах 5G", *Вісник НТУУ "КПІ". Серія: Радіотехніка, Радіоапаратобудування*, № 81, с. 21-29, 2020. doi: 10.20535/RADAP.2020.81.21-29.
- [6] A. B. Булашенко, "Розподіл ресурсів для пристроїв малої потужності технології M2M в мережах 5G", *Наукові вісті КПІ*, вип. 3, с. 7-13, 2020. doi: 10.20535/kpi-sn.2020.3.203863.
- [7] O. Yu. Myronchuk, A. A. Shpylka, and S. Ya. Zhuk, "Two-stage method for joint estimation of information symbols and channel frequency response in OFDM com-

- munication systems", *Radioelectron. Commun. Syst.*, vol. 63, no. 1, pp. 418-429, 2020. doi: 10.3103/S073527272008004X.
- [8] O. Myronchuk, O. Shpylka, and S. Zhuk, "Algorithm of channel frequency response estimation in orthogonal frequency division multiplexing systems based on Kalman filter", in *IEEE 15th Int. Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*. Lviv-Slavske, 2020. doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235385.
- [9] F. Dubrovka, S. Piltyay, O. Sushko, R. Dubrovka, M. Lytvyn, and S. Lytvyn, "Compact X-band stepped-thickness septum polarizer", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*, Kharkiv, 2020, pp. 135-138. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252583.
- [10] F. Dubrovka, S. Martunyk, R. Dubrovka, M. Lytvyn, S. Lytvyn, Yu. Ovsianyk, S. Piltyay et al., "Circularly polarised X-band H11- and H21-modes antenna feed for monopulse autotracking ground station", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*, Kharkiv, 2020, pp. 196-202. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252600.
- [11] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "A novel wideband coaxial polarizer", in *IEEE Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*, Odessa, 2013, pp. 473-474. doi: 10.1109/ICATT.2013.6650816.
- [12] D. Yu. Kulik, L. P. Mospan, A. O. Perov, and N. G. Kolmakova, "Compact-size polarization rotators on the basis of irises with rectangular slots", *Telecom. and Radio Engineering*, vol. 75, no. 1, pp. 1-9, 2016. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.10.
- [13] D. Yu. Kulik, S. A. Steshenko, and A. A. Kirilenko, "Compact polarization plane rotator at a given angle in the square rectangular waveguide", *Telecom. and Radio Engineering*, vol. 76, no. 1, pp. 855-864, 2017. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i10.20.
- [14] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Analytical technique for iris polarizers development", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*, Kharkiv, 2020, pp. 464-469.
- [15] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Compact polarizers for satellite information systems", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*, Kharkiv, 2020, pp. 350-355.
- [16] С. И. Пильтай, А. В. Булашенко, Е. И. Калиниченко, и А. В. Булашенко, "Высокоэффективный волноводный поляризатор для спутниковых информационных систем", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 14-26, 2020. doi: 10.24025/2306-4412.4.2020.217129.
- [17] S. I. Piltyay, O. Yu. Sushko, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Compact Ku-band iris polarizers for satellite telecommunication systems", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 19, pp. 1673-1690, 2020. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i19.10.
- [18] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 5, p. 05024, 2020. doi: 10.21272/jnep.12(5).05024.
- [19] A. A. Kirilenko, S. O. Steshenko, V. N. Derkach, and Y. M. Ostryzhnyi, "A tunable compact polarizer in a circular waveguide", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 2, pp. 592-596, 2019. doi: 10.1109/TMTT.2018.2881089.
- [20] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Analytical synthesis of waveguide iris polarizers", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 18, pp. 1579-1597, 2020. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i18.10.
- [21] S. Piltyay, A. Bulashenko, H. Kushnir, and O. Bulashenko, "Information resources economy in satellite systems based on new microwave polarizers with tunable posts", *Path of Science*, vol. 6, no. 11, pp. 5001-5010, 2020. doi: 10.22178/pos.55-1.
- [22] А. В. Булашенко, С. І. Пільтай, Г. С. Кушнір, та О. В. Булашенко, "Компактний хвилевідний поляризатор із трьома протифазними штирями", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, вип. 5, с. 97-104, 2020. doi: 10.31649/1997-9266-2020-151-5-97-104.
- [23] А. В. Булашенко, С. І. Пільтай, Є. І. Калініченко, та О. В. Булашенко, "Регульований поляризатор на основі квадратного хвилеводу із діафрагмами та штирями", *Технічна інженерія*, вип. 86, № 2, с. 108-116, 2020. doi: 10.26642/ten-2020-2(86)-108-116.

- [24] A. Bulashenko, S. Pilyay, Ye. Kalinichenko, and O. Bulashenko, "Mathematical modeling of iris-post sections for waveguide filters, phase shifters and polarizers", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*, Kyiv, 2020, pp. 330-336. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349321.
- [25] S. Pilyay, A. Bulashenko, H. Kushnir, and O. Bulashenko, "New tunable iris-post square waveguide polarizers for satellite information systems", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*, Kyiv, 2020, pp. 132-137. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349357.
- [26] J. R. Sanchez, C. Bachiller, M. Julia, B. Nova, H. Esteban, and V. E. Boria, "Microwave filter based on substrate integrated waveguide with alternating dielectric line sections", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 28, no. 11, pp. 990-992, 2018. doi: 10.1109/LMWC.2018.2871644.
- [27] Y.-P. Lyu, L. Zhu, and C.-H. Cheng, "Proposal and synthesis design of differential phase shifters with filtering function", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 8, pp. 2906-2917, 2017. doi: 10.1109/TMTT.2017.2673819.
- [28] A. W. Pollak, and M. E. Jones, "A compact quad-ridge orthogonal mode transducer with wide operational bandwidth", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 3, pp. 422-425, 2018. doi: 10.1109/LAWP.2018.2793465.
- [29] F. F. Dubrovka, and S. I. Pilyay, "Prediction of eigenmodes cutoff frequencies of sectoral coaxial ridged waveguides", in *Int. Conf. on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Lviv-Slavske, 2012, p. 191.
- [30] S. I. Pilyay, "Numerically effective basis functions in integral equation technique for sectoral coaxial ridged waveguides", in *14-th Int. Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory*, Kyiv, 2012, pp. 492-495. doi: 10.1109/MMET.2012.6331195.
- [31] L. A. Rud, and K. S. Shpachenko, "Polarizers on a segment of square waveguide with diagonally ridges and adjustment iris", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 55, no. 10, pp. 458-463, 2012. doi: 10.3103/S0735272712100044.
- [32] A. A. Kirilenko, D. Yu. Kulik, and L. A. Rud, "Stepped approximation technique for designing coaxial waveguide polarizers", in *IX IEEE Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*, Odessa, 2013, pp. 470-472. doi: 10.1109/ICATT.2013.6650815.
- [33] F. F. Dubrovka, and S. I. Pilyay, "Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Numerical results", *Radioelectronics and Comm. Systems*, vol. 57, no. 2, pp. 59-69, 2014. doi: 10.3103/S0735272714020010.
- [34] S. I. Pilyay, and F. F. Dubrovka, "Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 1. Theory", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparaturbuduvannia*, vol. 54, pp. 13-23, 2013. doi: 10.20535/RADAP.2013.54.13-23.
- [35] S. I. Pilyay, "Enhanced C-band coaxial orthomode transducer", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparaturbuduvannia*, vol. 58, pp. 27-34, 2014. doi: 10.20535/RADAP.2014.58.27-34.
- [36] F. F. Dubrovka, and S. I. Pilyay, "Boundary problem solution for eigenmodes in coaxial quad-ridged waveguides", *Information and Telecommunication Sciences*, vol. 5, no. 1, pp. 48-61, 2014.
- [37] G. Mishra, S. K. Sharma, and J.-C. Chieh, "A circular polarized feed horn with inbuilt polarizer for offset reflector antenna for W-band CubeSat applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 3, pp. 1904-1909, 2018. doi: 10.1109/TAP.2018.2886704.
- [38] A. V. Bulashenko, S. I. Pilyay, and I. V. Demchenko, "Optimization of a polarizer based on a square waveguide with irises", *Science-Based Technologies*, vol. 47, no. 3, pp. 287-297, 2020. doi: 10.18372/2310-5461.47.14878.
- [39] A. V. Bulashenko, S. I. Pilyay, and I. V. Demchenko, "Equivalent microwave circuit technique for waveguide iris polarizers development", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparaturbuduvannia*, vol. 83, pp. 17-28, 2020. doi: 10.20535/RADAP.2020.83.17-28.
- [40] A. V. Bulashenko, S. I. Pilyay, and I. V. Demchenko, "Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 6, p. 06026, 2020. doi: 10.21272/jnep.12(6).06026.

- [41] S. Piltyay, A. Bulashenko, Ye. Herhil, and O. Bulashenko, "FDTD and FEM simulation of microwave waveguide polarizers", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*, Kyiv, 2020, pp. 132-137. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349339.
- ### References
- [1] W. L. Stutzman, *Polarization in electromagnetic systems*. Artech House, Norwood, 2018.
- [2] A. Bulashenko, S. Piltyay, A. Polishuk, and O. Bulashenko, "New traffic model of M2M technology in 5G wireless sensor networks", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*, Kyiv, 2020, pp. 125-131. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349305.
- [3] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Energy efficiency of the D2D direct connection system in 5G network", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*, Kharkiv, 2020, pp. 324-329.
- [4] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Wireless sensor networks connectivity in heterogeneous 5G mobile systems", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*, Kharkiv, 2020, pp. 508-513.
- [5] A. V. Bulashenko, "Evaluation of D2D communications in 5G networks", *Visnyk NTUU "KPI". Seriya: Radiotekhnika, Radioaparaturbuduvannia*, no. 81, pp. 21-29, 2020 [in Ukrainian]. doi: 10.20535/RADAP.2020.81.21-29.
- [6] A. V. Bulashenko, "Resource allocation for low-power devices of M2M technology in 5G networks", *Naukovi visti KPI*, vol. 3, pp. 7-13, 2020 [in Ukrainian]. doi: 10.20535/kpi-sn.2020.3.203863.
- [7] O. Yu. Myronchuk, A. A. Shpylka, and S. Ya. Zhuk, "Two-stage method for joint estimation of information symbols and channel frequency response in OFDM communication systems", *Radioelectron. Commun. Syst.*, vol. 63, no. 1, pp. 418-429, 2020. doi: 10.3103/S073527272008004X.
- [8] O. Myronchuk, O. Shpylka, and S. Zhuk, "Algorithm of channel frequency response estimation in orthogonal frequency division multiplexing systems based on Kalman filter", in *IEEE 15th Int. Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunica-*
- tions and Computer Engineering*. Lviv-Slavske, 2020. doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235385.
- [9] F. Dubrovka, S. Piltyay, O. Sushko, R. Dubrovka, M. Lytvyn, and S. Lytvyn, "Compact X-band stepped-thickness septum polarizer", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*, Kharkiv, 2020, pp. 135-138. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252583.
- [10] F. Dubrovka, S. Martunyuk, R. Dubrovka, M. Lytvyn, S. Lytvyn, Yu. Ovsianyk, S. Piltyay et al., "Circularly polarised X-band H11- and H21-modes antenna feed for monopulse autotracking ground station", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*, Kharkiv, 2020, pp. 196-202. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252600.
- [11] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "A novel wideband coaxial polarizer", in *IEEE Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*, Odessa, 2013, pp. 473-474. doi: 10.1109/ICATT.2013.6650816.
- [12] D. Yu. Kulik, L. P. Mospan, A. O. Perov, and N. G. Kolmakova, "Compact-size polarization rotators on the basis of irises with rectangular slots", *Telecom. and Radio Engineering*, vol. 75, no. 1, pp. 1-9, 2016. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.10.
- [13] D. Yu. Kulik, S. A. Steshenko, and A. A. Kirilenko, "Compact polarization plane rotator at a given angle in the square rectangular waveguide", *Telecom. and Radio Engineering*, vol. 76, no. 1, pp. 855-864, 2017. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i1.020.
- [14] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Analytical technique for iris polarizers development", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*, Kharkiv, 2020, pp. 464-469.
- [15] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Compact polarizers for satellite information systems", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*, Kharkiv, 2020, pp. 350-355.
- [16] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, Ye. I. Kalnichenko, and O. V. Bulashenko, "High performance waveguide polarizer for satellite information systems", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu*, no. 4, pp. 14-26, 2020 [in Russian]. doi: 10.24025/2306-4412.4.2020.217129.
- [17] S. I. Piltyay, O. Yu. Sushko, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko,

- "Compact Ku-band iris polarizers for satellite telecommunication systems", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 19, pp. 1673-1690, 2020.
doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i19.10.
- [18] S. I. Pilyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 5, p. 05024, 2020.
doi: 10.21272/jnep.12(5).05024.
- [19] A. A. Kirilenko, S. O. Steshenko, V. N. Derkach, and Y. M. Ostryzhnyi, "A tunable compact polarizer in a circular waveguide", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 2, pp. 592-596, 2019.
doi: 10.1109/TMTT.2018.2881089.
- [20] S. I. Pilyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Analytical synthesis of waveguide iris polarizers", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 18, pp. 1579-1597, 2020.
doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i18.10.
- [21] S. Pilyay, A. Bulashenko, H. Kushnir, and O. Bulashenko, "Information resources economy in satellite systems based on new microwave polarizers with tunable posts", *Path of Science*, vol. 6, no. 11, pp. 5001-5010, 2020.
doi: 10.22178/pos.55-1.
- [22] A. V. Bulashenko, S. I. Pilyay, H. S. Kushnir, and O. V. Bulashenko, "Compact waveguide polarizer with three antiphase posts", *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho institutu*, vol. 5, pp. 97-104, 2020 [in Ukrainian].
doi: 10.31649/1997-9266-2020-151-5-97-104.
- [23] A. V. Bulashenko, S. I. Pilyay, Ye. I. Kalinichenko, and O. V. Bulashenko, "Tunable square waveguide polarizer with irises and posts", *Tekhnichna inzheneriia*, vol. 86, no. 2, pp. 108-116, 2020 [in Ukrainian].
doi: 10.26642/ten-2020-2(86)-108-116.
- [24] A. Bulashenko, S. Pilyay, Ye. Kalinichenko, and O. Bulashenko, "Mathematical modeling of iris-post sections for waveguide filters, phase shifters and polarizers", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*, Kyiv, 2020, pp. 330-336.
doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349321.
- [25] S. Pilyay, A. Bulashenko, H. Kushnir, and O. Bulashenko, "New tunable iris-post square waveguide polarizers for satellite information systems", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*, Kyiv, 2020, pp. 132-137.
doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349357.
- [26] J. R. Sanchez, C. Bachiller, M. Julia, B. Nova, H. Esteban, and V. E. Boria, "Microwave filter based on substrate integrated waveguide with alternating dielectric line sections", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 28, no. 11, pp. 990-992, 2018.
doi: 10.1109/LMWC.2018.2871644.
- [27] Y.-P. Lyu, L. Zhu, and C.-H. Cheng, "Proposal and synthesis design of differential phase shifters with filtering function", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 8, pp. 2906-2917, 2017.
doi: 10.1109/TMTT.2017.2673819.
- [28] A. W. Pollak, and M. E. Jones, "A compact quad-ridge orthogonal mode transducer with wide operational bandwidth", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 3, pp. 422-425, 2018.
doi: 10.1109/LAWP.2018.2793465.
- [29] F. F. Dubrovka, and S. I. Pilyay, "Prediction of eigenmodes cutoff frequencies of sectoral coaxial ridged waveguides", in *Int. Conf. on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Lviv-Slavske, 2012, p. 191.
- [30] S. I. Pilyay, "Numerically effective basis functions in integral equation technique for sectoral coaxial ridged waveguides", in *14-th Int. Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory*, Kyiv, 2012, pp. 492-495.
doi: 10.1109/MMET.2012.6331195.
- [31] L. A. Rud, and K. S. Shpachenko, "Polarizers on a segment of square waveguide with diagonally ridges and adjustment iris", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 55, no. 10, pp. 458-463, 2012.
doi: 10.3103/S0735272712100044.
- [32] A. A. Kirilenko, D. Yu. Kulik, and L. A. Rud, "Stepped approximation technique for designing coaxial waveguide polarizers", in *IX IEEE Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*, Odessa, 2013, pp. 470-472.
doi: 10.1109/ICATT.2013.6650815.
- [33] F. F. Dubrovka, and S. I. Pilyay, "Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Numerical results", *Radioelectronics and Comm. Systems*, vol. 57, no. 2, pp. 59-69, 2014.
doi: 10.3103/S0735272714020010.

- [34] S. I. Pilyay, and F. F. Dubrovka, "Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 1. Theory", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannia*, vol. 54, pp. 13-23, 2013.
doi: 10.20535/RADAP.2013.54.13-23.
- [35] S. I. Pilyay, "Enhanced C-band coaxial orthomode transducer", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannia*, vol. 58, pp. 27-34, 2014.
doi: 10.20535/RADAP.2014.58.27-34.
- [36] F. F. Dubrovka, and S. I. Pilyay, "Boundary problem solution for eigenmodes in coaxial quad-ridged waveguides", *Information and Telecommunication Sciences*, vol. 5, no. 1, pp. 48-61, 2014.
- [37] G. Mishra, S. K. Sharma, and J.-C. Chieh, "A circular polarized feed horn with inbuilt polarizer for offset reflector antenna for W-band CubeSat applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 3, pp. 1904-1909, 2018.
doi: 10.1109/TAP.2018.2886704.
- [38] A. V. Bulashenko, S. I. Pilyay, and I. V. Demchenko, "Optimization of a polarizer based on a square waveguide with iris", *Science-Based Technologies*, vol. 47, no. 3, pp. 287-297, 2020.
doi: 10.18372/2310-5461.47.14878.
- [39] A. V. Bulashenko, S. I. Pilyay, and I. V. Demchenko, "Equivalent microwave circuit technique for waveguide iris polarizers development", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparotobuduvannia*, vol. 83, pp. 17-28, 2020.
doi: 10.20535/RADAP.2020.83.17-28.
- [40] A. V. Bulashenko, S. I. Pilyay, and I. V. Demchenko, "Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 6, p. 06026, 2020.
doi: 10.21272/jnep.12(6).06026.
- [41] S. Pilyay, A. Bulashenko, Ye. Herhil, and O. Bulashenko, "FDTD and FEM simulation of microwave waveguide polarizers", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*, Kyiv, 2020, pp. 132-137.
doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349339.

S. I. Pilyay¹, *Ph.D., associate professor*,
e-mail: s.piltai@kpi.ua

A. V. Bulashenko¹, *senior lecturer*,
e-mail: a.bulashenko@kpi.ua

I. V. Fesyuk¹, *student*,
e-mail: irinkafes255@gmail.com

O. V. Bulashenko², *student*
e-mail: alex.bulashenko2020@gmail.com

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

²Ivan Kozhedub Shostka professional college of Sumy State University
Institutska st., 1, Shostka, Sumy region, 41100, Ukraine

COMPACT POLARIZATION CONVERTER FOR SATELLITE ANTENNA SYSTEMS

The article proposes a simple method of optimization and development of polarization devices with diaphragms using the method of equivalent microwave circuits. The principle of the method consists in the separation of the network of the waveguide polarization processing device into simple equivalent circuits. Each circuit is described by its scattering and transmission matrices. Next, the main characteristics of the presented device are expressed through the elements of the general wave scattering matrix. The basic electromagnetic characteristics of the device include the following: phase, matching and polarization. A polarization processing device with three diaphragms based on a square waveguide has been developed. In the frequency range 13.0-14.4 GHz a procedure of optimization of the electromagnetic characteristics has been performed. In the operating frequency band the designed waveguide device provides the phase difference within the range of $90^\circ \pm 4.0^\circ$. The peak value of its level of voltage standing wave equals to the value of 2.04. The maximum value of the ellipticity factor is 0.6 dB, and the minimum level of cross-polarization isolation is 29.5 dB. To verify the correctness of the obtained results, numerical simulation of the device has been performed using the finite

integration method in the frequency domain and the finite element method in the time domain. The simulation results have shown that the presented method has a slight discrepancy with the known electromagnetic methods of analysis of microwave devices. Therefore, the developed new waveguide polarization device with three diaphragms presents consistent and high-quality electromagnetic characteristics in the entire operating frequency range of 13.0–14.4 GHz. The developed polarization converter can be used in antenna systems, in which the polarization signal processing is carried out.

Keywords: polarizer; waveguide polarizer; diaphragm; waveguide; phase difference; ellipticity factor; crosspolar isolation.

С. І. Пільтяй¹, к.т.н., доцент,

e-mail: s.piltai@kpi.ua

А. В. Булашенко¹, ст. викладач,

e-mail: a.bulashenko@kpi.ua

І. В. Фесюк¹, студентка,

e-mail: irinkafes255@gmail.com

О. В. Булашенко², студент

e-mail: alex.bulashenko2020@gmail.com

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

²Шосткинський фаховий коледж імені Івана Кожедуба Сумського державного університету
вул. Інститутська, 1, м. Шостка, Сумська обл., 41100, Україна

КОМПАКТНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ДЛЯ СУПУТНИКОВИХ АНТЕННИХ СИСТЕМ

У статті запропоновано простий метод оптимізації та розробки поляризаційних пристроїв з діафрагмами за допомогою методу еквівалентних мікрохвильових схем. Принцип методу полягає у розбитті схеми хвильоводного пристрою обробки поляризації на прості еквівалентні схеми. Кожна схема описується своїми матрицями розсіювання та передачі. Далі основні характеристики представленого пристрою виражаємо через елементи загальної хвильової матриці розсіювання. До базових електромагнітних характеристик пристрою належать такі: фазові, узгоджуючі та поляризаційні. Було розроблено поляризаційний пристрій із трьома діафрагмами на основі квадратного хвильоводу. У діапазоні частот 13,0–14,4 ГГц було здійснено процедуру оптимізації електромагнітних характеристик. Сконструйований хвильовідний пристрій у робочому діапазоні частот підтримує диференційний фазовий зсув у межах $90^\circ \pm 4,0^\circ$. Пікове значення його коефіцієнта стійкої хвилі за напругою набуває значення 2,04. Максимальне значення коефіцієнта еліптичності становить 0,6 дБ, а мінімальний рівень крос-поляризаційної розв'язки – 29,5 дБ. Для перевірки правильності отриманих результатів було здійснено числове моделювання пристрою із використанням методу скінченного інтегрування в частотній області та методу скінчених елементів у часовій області. Результати моделювання показали, що представлений метод має невелику розбіжність із відомими електродинамічними методами аналізу мікрохвильових пристроїв. Тому розроблений новий хвильовідний поляризаційний пристрій з трьома діафрагмами представляє узгоджені та якісні електромагнітні характеристики в усьому робочому діапазоні частот 13,0–14,4 ГГц. Розроблений поляризаційний пристрій може використовуватися в антенних системах, де здійснюється поляризаційна обробка сигналів.

Ключові слова: поляризатор, хвильовідний поляризатор, діафрагма, хвильовід, диференційний фазовий зсув, коефіцієнт еліптичності, кросполяризаційна розв'язка.

УДК 621.396

[0000-0002-6927-8663] **И. В. Забегалов**, преподаватель,

e-mail: igor_zabegalov@meta.ua

[0000-0002-4126-8754] **Я. Э. Шарпан**, студент,

e-mail: yar_sharpan@rambler.ru

Шосткинский профессиональный колледж имени Ивана Кожедуба

Сумского государственного университета

ул. Институтская, 1, г. Шостка, Сумская обл., 41100, Украина

[0000-0001-5941-9461] **И. И. Дихтярук**, студент,

e-mail: kotovan99@i.ua

[0000-0002-6927-8663] **С. И. Пильтяй**, к.т.н., доцент,

e-mail: piltyay_stepan@ua.fm

[0000-0002-4987-4978] **А. В. Булашенко**, ст. преподаватель

e-mail: an_bulashenko@i.ua

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина

ВОЛНОВОДНАЯ СИСТЕМА ПИТАНИЯ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ С КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

В статье приведена методика разработки и оптимизации системы питания рупорной антенны с круговой поляризацией. Система питания предложенной рупорной антенны состоит из прямоугольного волновода со щелью. Такая простая конструкция системы питания устраняет необходимость разработки отдельного поляризационного устройства. Спроектированная система питания рупорной антенны с круговой поляризацией используется на рабочей частоте 8,0 ГГц. Предложенная антенна обеспечивает максимальный коэффициент усиления 21 дБ для правосторонней круговой поляризации, 12 дБ для левосторонней круговой поляризации и кроссполяризационную развязку выше 10 дБ.

Ключевые слова: круговая поляризация, рупорная антенна, волновод, щель, коэффициент усиления, диаграмма направленности.

Введение. Телекоммуникационные системы связи последнее время развиваются стремительно. Ведущее место среди них занимают сотовые системы связи 5G с новыми технологиями OFDM [1-3], M2M [4-6], D2D [7-9]. Такие технологии увеличивают качество связи, скорость передачи данных и количество обслуживаемых абонентов.

Кроме того, ведущее место среди телекоммуникационных систем связи занимают спутниковые системы связи. В них широко используются антенные системы. В таких антеннах применяется поляризационная обработка сигналов, которая использует сигналы с круговой поляризацией. Такой подход дает возможность эффективно уменьшить интерференционные помехи, которые возникают по причине многолучевого распространения сигналов [10]. Сигналы изменяют свою поляризацию благодаря отражению от разных объектов. Таким образом, на приемной стороне

удается уменьшить уровень искажений сигналов. В свою очередь это увеличивает пропускную емкость телекоммуникационных каналов связи.

Часто в системах спутниковой связи применяются рупорные антенны для фиксированных и широковещательных услуг [11, 12]. Более того, такие антенны применяются для спутниковой картографии высокого разрешения, для систем отслеживания спутников в диапазоне от 7,25 ГГц до 14,5 ГГц [13]. Диапазон частот 12,75–13,25 ГГц применяют в восходящих линиях связи для коммерческого телевидения и фиксированной спутниковой связи [14].

Сигналы с круговой поляризацией широко применяются различными спутниковыми системами связи. Среди них можно выделить системы отслеживания телеметрии и дистанционного управления, системы дистанционного зондирования и спутниковой связи [15, 16].

Традиционно поляризационные устройства осуществляют поляризационную обработку. Такие устройства, как правило, конструируются на основе прямоугольного или круглого волновода [17-19]. Ключевыми элементами таких устройств являются реактивности, которые располагаются внутри волновода. Благодаря такой особенности на их выходе формируется сдвиг фазы между основными модами в 90° . Среди таких структур первыми появились структуры со штырями цилиндрической и прямоугольной формы [20-22]. Данные поляризаторы являются относительно узкополосными. Далее следует выделить волноводные поляризаторы на основе реактивных элементов в виде индуктивных и емкостных диафрагм [23-29]. Сегодня существует большое количество методик по расчету таких устройств [30-36]. Особое внимание занимают конструкции с диафрагмами в виде щелевых структур [37-39]. Такие структуры обладают более широкой полосой частот по сравнению со структурами в виде штырей. Более того, используются комбинированные поляризационные устройства в виде диафрагм и штырей [40, 41]. Такой подход дает возможность осуществлять настройку устройств. Также существуют поляризационные устройства на основе коаксиальных и ребристых волноводов [42-48]. Эти конструкции позволяют расширить полосу пропускания устройств за счет периодических структур, но их конструкции имеют сложную форму и удлиненные размеры. Последнее время широкое распространение получили поляризационные устройства на основе волноводов с перегородками различной формы [49]. Поляризаторы с перегородкой применяются в системах связи 5G [50].

Кроме того, поляризационную обработку сигналов может осуществлять система питания конической или пирамидальной рупорной антенны. Применение рупорной антенны обеспечивает следующие преимущества: высокий коэффициент усиления антенны, высокий коэффициент полезного действия, простая конструкция. Более того, рупорные антенны обеспечивают меньшие квадратичные фазовые ошибки, что приводит к более узкой диаграмме направленности. Круговую поляризацию можно получить с помощью металлической перегородки в круглых волноводах, добавления гофр в волновод, диэлектрических пластин, канавок или диафрагм.

Анализ последних исследований и публикаций. В [51] описывается конструкция рупорной антенны, которая работает в двух диапазонах частот. Антенна работает на передачу в С-диапазоне частот 5,85–6,65 ГГц и в Х-диапазоне частот 7,9–8,4 ГГц. Кроме того, данная антенна работает в режиме приема в С-диапазоне 3,4–4,2 ГГц и в Х-диапазоне 7,25–7,75 ГГц. Такая многодиапазонная рупорная антенна с двойной круговой поляризацией применяется в спутниковой связи. Она обеспечивает одновременное излучение сигналов с высокой мощностью и прием сигналов с низким уровнем шумов. В качестве питания широкополосной рефлекторной антенны были предложены рупорные антенны различной геометрии в [52]. Конструкция предложенной рупорной антенны была в виде гребней, что значительно улучшило излучающие характеристики рупора. Кроме того, такой рупор с эллиптической боковой стенкой питает рефлекторную антенну с широкой полосой. Такой рупор поддерживает ширину луча 10 дБ в широком диапазоне частот. Результаты разработки системы питания антенны описаны в работе [53]. Предложенная конструкция за счет круглого волновода содержит механизмы поляризационного преобразования в виде канавок. Благодаря этому формируются сигналы с круговой поляризацией. Разработанная система обеспечивает наибольшую величину коэффициента эллиптичности 1,2 дБ в диапазоне частот от 79,5 ГГц до 88 ГГц. К сожалению, такую конструкцию сложно изготовить, что ограничивает ее область применения. В [54] представлена конструкция широкополосной антенны с двойной круговой поляризацией. Антенна разработана на основе оптимизированного поляризатора с перегородкой и рупорной антенны в W-диапазоне частот. Предложенная антенна может принимать два сигнала с круговой поляризацией одновременно. Такими сигналами являются сигналы с левой круговой поляризацией и сигналы с правой круговой поляризацией. Предложенная антенна в полосе частот 76,8–94,7 ГГц обеспечивает максимальное значение коэффициента эллиптичности 5,8 дБ, максимальное значение коэффициента отражения -15 дБ и минимальное значение изоляции между поляризациями 20 дБ. Высокопроизводительная рупорная антенна с двойной круговой поляризацией в V-диапазоне частот 54–60 ГГц была предложена в [55]. Данная антенна имеет

в своей основе круглый волновод, который питают два порта в форме канавок. Каждая отдельная канавка наклонена под углом 45° по отношению к входным портам. Такое расположение обеспечивает сдвиг фаз в 90° на выходе. В результате такая система формирует правую круговую поляризацию и левую круговую поляризацию. Разработанная рупорная антенна обеспечивает наибольшее значение коэффициента эллиптичности 2,2 дБ. Изоляция между портами составляет более 15 дБ, а поляризационная развязка – более 25 дБ во всем рабочем диапазоне частот. Более того, такая антенна обеспечивает симметричные диаграммы направленности. В [56] описана конструкция компактной рупорной антенны с круговой поляризацией в W-диапазоне частот 75–110 ГГц. Питание антенны осуществляется через щель, которая расположена под углом 45° к оси круглого волновода. Такая конфигурация дает возможность получить излучение с широкой полосой частот и круговой поляризацией. Разработанная антенна может поддерживать коэффициент эллиптичности менее 3 дБ. Конструкция двухдиапазонной рупорной антенны с круговой поляризацией представлена в [57]. Рупорная антенна сделана в виде неоднородного гофра. При синтезе данной антенны используют комбинацию метода согласования мод и генетического алгоритма. Предложенная рупорная антенна имеет 19 неоднородных гофров в секциях преобразования мод. Антенна была спроектирована для K-диапазона 19,6–21,2 ГГц и для Ka-диапазона частот 29,4–31 ГГц. Представленная конструкция антенного устройства обеспечивает хорошую поляризацию, низкий уровень боковых лепестков и симметричные диаграммы направленности. В [58] представлены результаты разработки гофрированной рупорной антенны с круговой поляризацией в X-диапазоне. Данная конструкция состоит из отражательной решетки в виде заземленного диэлектрического слоя толщиной 0,5–10 мм. Благодаря этому антенное устройство формирует сигналы с левой круговой поляризацией и сигналы с правой круговой поляризацией. Конструкция новой рупорной антенны в виде пары скрученных гребней с круговой поляризацией представлена в [59]. Такая конструкция гребней позволяет достичь полосы пропускания с широким осевым отношением. Кроме того, предложенная конструкция дает возможность осуществлять настройку согласования сопро-

тивления. С помощью программы CST Microwave Studio в X-диапазоне частот была смоделирована схема формирования сигналов с правой круговой поляризацией. Такая антенна обеспечивает пиковое усиление антенны от 8,0 дБ до 10,1 дБ в рабочем диапазоне частот. Кроме того, пиковое значение коэффициента эллиптичности составляет 3 дБ в двух диапазонах частот 7,43–12,8 ГГц и 7,63–15,00 ГГц. В [60] приведены результаты конструирования рупорной антенны с круговой поляризацией. В разработанной антенне можно возбуждать моды высшего порядка. Рассмотренная конструкция антенны состоит из металлических пластин, которые размещены на отверстиях конической рупорной антенны. Металлическая антенна поддерживает коэффициент эллиптичности менее 3 дБ в диапазоне частот 2,95–3,31 ГГц.

Таким образом, разработка рупорных антенн в качестве систем питания спутниковых антенных систем является сегодня актуальной задачей.

Цель и задачи исследования. Целью данной статьи является повышение эффективности рупорной антенны с круговой поляризацией для спутникового диапазона частот 7,5–10,0 ГГц за счет улучшения характеристик максимального усиления и отражения.

Для этого решаются следующие задачи:

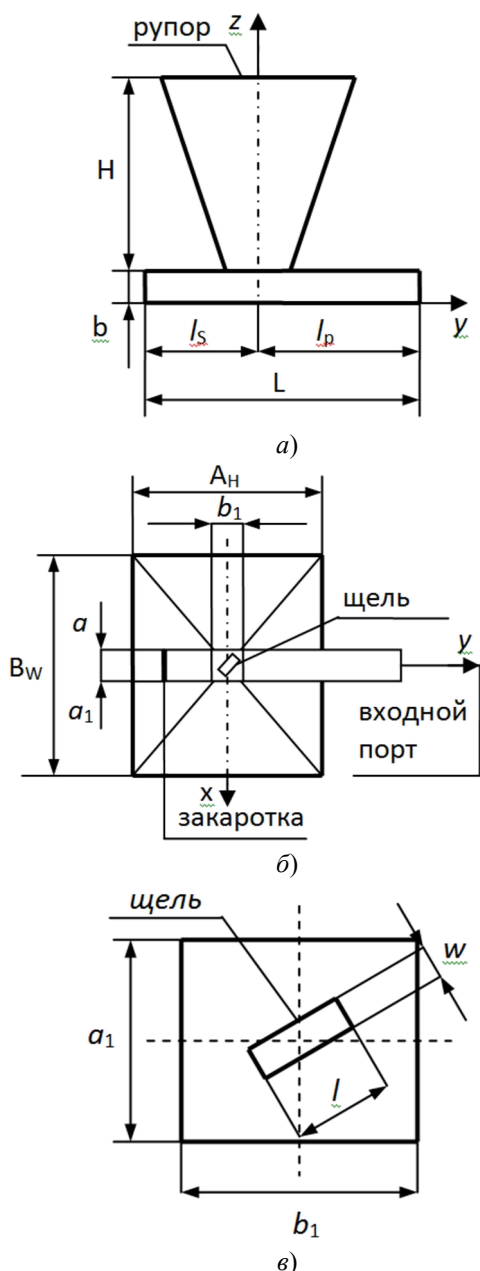
1. Создание соответствующей системы питания антенны, что обеспечит прием сигналов с разными видами поляризаций.

2. Оптимизация характеристик антенного устройства в рабочем диапазоне частот 7,5–10,0 ГГц. Коэффициент усиления разработанной рупорной антенны должен превышать 20 дБ для правой круговой поляризации и 10 дБ для левой круговой поляризации. При этом устройство должно обеспечивать надлежащий коэффициент отражения на рабочей частоте на уровне, превышающем значение -16 дБ.

Изложение основного материала. На рисунке 1 представлена конструкция пирамидальной рупорной антенны с системой питания в виде щели. Эта щель прорезана в прямоугольном волноводе. С одной стороны она имеет закоротку, которая увеличивает эффективность за счет минимизации потерь. С другой стороны она имеет входной порт. Для получения круговой поляризации в волновод помещают щель под наклоном. Центр щели расположен на расстоянии половины длины вол-

ны, а длина щели должна быть приблизительно равной половине длины волны в свободном пространстве. Размер сечения прямоугольного волновода выбран таким образом, чтобы в нем распространялись лишь моды TE_{10} и TE_{01} .

Такая конструкция системы питания использует прямоугольный волновод со щелью под углом 45° в широкой стенке прямоугольного волновода. Такой подход обеспечивает преимущества по конструкции, весу, объему, управляемой мощности, направленности и эффективности.



а) вид сбоку; б) вид сверху; в) увеличенный вид щелевого отверстия

Рисунок 1 – Система питания рупорной антенны через щелевое отверстие

Фазовый сдвиг на выходе рупорной антенны обеспечивается при помощи следующего выражения [10]:

$$\Delta\varphi = \beta_1 L - \beta_2 L = 90^\circ, \quad (1)$$

где β_1 является постоянной распространения моды TE_{10} , β_2 является постоянной распространения моды TE_{01} .

В соответствии с теорией волноводов постоянная распространения в прямоугольном волноводе определяется выражением [61]

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}, \quad (2)$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве, a и b – величины размеров широкой и узкой стенок прямоугольного волновода.

Длина волны в волноводе определяется

$$\lambda_B = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_C}\right)^2}}, \quad (3)$$

где λ_C – критическая длина волны в волноводе, λ_0 – длина волны в свободном пространстве.

В [61] предлагается длина L прямоугольного волновода в направлении распространения y больше $0,75 \lambda_B$, где λ_B – длина волны в прямоугольном волноводе. Она определяется как расстояние между двумя равными фазовыми плоскостями вдоль волновода.

С помощью выражений (1), (2) для рабочей частоты 8 ГГц были определены длина и ширина прямоугольного волновода: $a = 18,35$ мм, $b = 17,85$ мм и $L = 15,4$ см.

После добавления щели тангенциальные компоненты полей E и H должны быть непрерывными через прорезь и волновод [12]. Вблизи резонанса напряжение примерно синусоидальное с длиной волны в свободном пространстве, при этом ток обращается в нуль на концах щели. Амплитуда напряжения зависит от длины и ширины щели. За пределами области резонанса напряжение относительно низкое. Электрическое поле, которое формируется в этой щели, производит текущее смещение, что заменяет прерывистый ток проводимости [12]. Следующий в системе координат, представленной на рисунке 1, ток в направлении y будет прерванный.

Для получения круговой поляризации щель должна быть вырезана в верхней части стенки прямоугольного волновода под углом 45° (рисунок 1). Центр наклонной щели должен совпадать с фазовым центром пирамидального рупора, в котором происходит возбуждение электромагнитной волны. Соответствующие размеры наклонной щели выбирают таким образом, чтобы возбуждение в прямоугольном волноводе привело к появлению двух ортогональных мод (TE_{10} и TE_{01}) одинаковой амплитуды [10]. Такой подход обеспечивает отличную общую поляризацию (правая круговая поляризация, RHCP). Напротив, если щель имеет угол 45° с наклоном влево, затем кроссполяризация (левая круговая поляризация, LHCP).

Расстояние от центра щели до закороченного конца прямоугольного волновода было оптимизировано при $l_s = 0,51 \lambda_v$, а расстояние от центра щели до порта ввода определялось значением $l_p = 0,92 \lambda_v$. Щель располагалась так, чтобы минимизировать коэффициент отражения в порте подачи. Таким образом, волновое сопротивление в центре щели примерно было равным импедансу свободного пространства. В результате, размеры щели были оптимизированы для достижения наилучшего коэффициента отражения на резонансной частоте. Ширина щели была определена из выражения $0,12 \lambda_0$, а длина щели определена из выражения $0,54 \lambda_0$.

Подход классической теории [13] использовался для анализа излучающих характеристик пирамидального рупора и для проверки осуществимости конструкции рупора элемента. Предположим, что фазовое распределение на устье пирамидального рупора меняется по направлениям x и y с равномерной квадратной скоростью.

Пирамидальный рупор возбуждается волнами TE_{10} и TE_{01} в волновод и его полное поле в апертуре определяются следующими выражениями [10]:

$$\begin{cases} E_s = \hat{y}E_y^{10} + \hat{x}jE_x^{01}, \\ H_s = -\frac{\hat{x}E_y^{10}}{Z_0} + \frac{\hat{y}jE_x^{01}}{Z_0}, \end{cases} \quad (4)$$

где Z_0 – волновое сопротивление в свободном пространстве, E_y^{10} – электрическое поле

на оси y для моды TE_{10} , E_x^{01} – электрическое поле на оси x для моды TE_{01} .

Рупор антенны сконструирован по принципу согласования входного импеданса так, чтобы импеданс внутри рупора имел плавное изменение в соответствии с импедансом свободного пространства. Геометрические размеры рупорной антенны можно оптимально рассчитать с применением уравнения пирамидального рупора [61], если известны коэффициент усиления (21 дБ), рабочая частота (8 ГГц) и размер основания рупора (a_1 и b_1). Оптимальный пирамидальный рупор производит максимальное усиление в плоскостях E и H . Диаграмма направленности рупорной антенны будет зависеть от A_H и B_w (размеры рупора в отверстии) и H (длина рупора (рисунок 1)), что также влияет на углы раскрытия рупора) вместе с a_1 и b_1 . Работа будет сосредоточена на определении остальных размеров для достижения желаемого усиления в зависимости от апертуры рупора, ширины рупора и высоты рупора [59]. Угол раскрытия должен обеспечиваться в диапазоне от 0 до 90° для поддержания минимального отражения и максимального усиления.

Процесс оптимизации осуществляется по следующей методике [12].

Результаты исследования. На рисунке 2 приведена зависимость коэффициента отражения в рабочем диапазоне частот 7,5–10 ГГц.

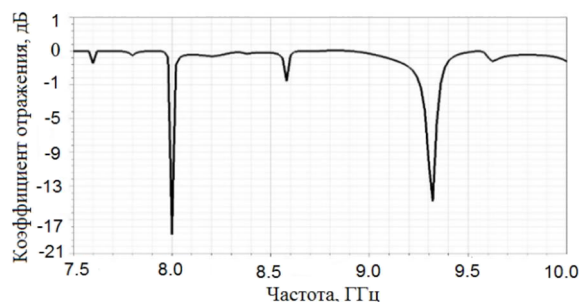


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента отражения от частоты

Из рисунка 2 видно, что коэффициент отражения на частоте 8,0 ГГц принимает значение -19 дБ. Кроме того, можно отметить, что на частоте 9,42 ГГц коэффициент отражения составляет -15 дБ.

На рисунках 3 и 4 приведена зависимость коэффициента усиления от угла для основной поляризации и кроссполяризации на частоте

8,0 ГГц для углов $\psi = 0^\circ$ и $\psi = 45^\circ$. Разница между усилениями правосторонней круговой поляризации (ПСКП) и левосторонней круговой поляризации (ЛСКП) принимает значение порядка 10 дБ. Разработанная рупорная антенна обеспечивает коэффициент усиления для общей поляризации 21 дБ для правосторонней круговой поляризации и усиление по кроссполяризации 12,5 дБ на центральной частоте диапазона $f = 8,0$ ГГц.

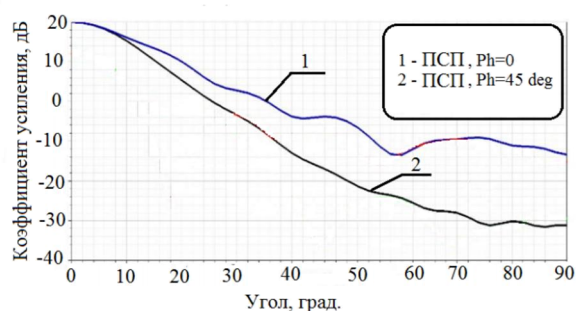


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента усиления от угла для ПСКП

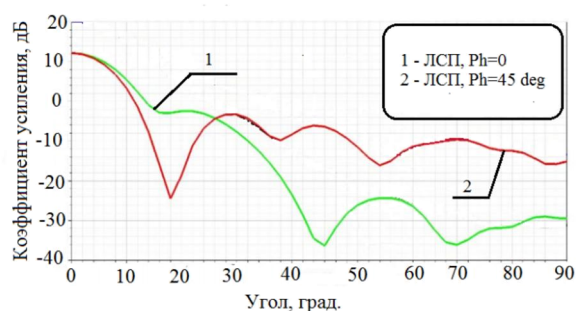


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента усиления от угла для ЛСКП

Стоит отметить, что максимальное усиление для 0° составляет 12 дБ для левосторонней круговой поляризации при значении углов $\psi = 0^\circ$ и $\psi = 45^\circ$.

Обсуждение результатов. Все геометрические размеры разработанной системы питания рупорной антенны представлены в таблице 1. Эти размеры предложенного устройства были получены в результате процедуры оптимизации для рабочего диапазона частот 7,5–10,0 ГГц.

Размеры основания рупора (a_1 и b_1) выбираются так, чтобы рупорная антенна располагалась по центру щели. Это также должно соответствовать щели внутри таким образом, чтобы $b_1 \leq a_1$ и $b_1 > 15$ мм. Наименьшие найденные размеры: $a_1 = a = 18,34$ мм и $b_1 = 15,75$ мм.

Таблица 1 – Геометрические размеры разработанного рупорного устройства для рабочего диапазона частот 7,5–10,0 ГГц

Размер	Значение
Длина апертуры рупора, A_H	161,1 мм
Ширина апертуры рупора, B_w	130,5 мм
Высота рупора, H	201 мм
Величина широкой стенки прямоугольного волновода, a	18,34 мм
Величина узкой стенки прямоугольного волновода, b	17,85 мм
Длина прямоугольного волновода, L	153,97 мм
Расстояние от центра щели до закороченной стороны, l_s	55,12 мм
Расстояние от центра щели до входа, l_p	98,75 мм
Ширина щели, w	3,58 мм
Длина щели, l	17,95 мм
Длина от основания рупора, a_1	18,34 мм
Ширина от основания рупора, b_1	15,75 мм

Другие основные конструктивные параметры системы питания рупорной антенны определены следующим образом: $A_H = 161,1$ мм (длина апертуры рупора), $B_w = 130,5$ мм (ширина рупора) и $H = 201$ мм (высота рупора). Размеры апертуры как в E , так и в H плоскости направления пирамидального рупора зависят от длины волны и были рассчитаны в соответствии с методикой [61]. Было установлено целевое значение усиления 21 дБ и высота рупорной антенны в плоскостях E и H равными.

Выводы. В статье предложена методика разработки и оптимизации системы питания рупорной антенны с круговой поляризацией. С ее помощью были улучшены коэффициент усиления и коэффициент отражения разработанной рупорной антенны. Предложенная конструкция используется на рабочей частоте 8,0 ГГц. Система питания антенны сделана в виде щели, которая размещена под углом 45° . Такая конструкция позволяет формировать две ортогональные моды, что обеспечивает сдвиг фазы на выходе 90° . Антенна обеспечивает максимальное усиление 21 дБ для правосторонней круговой поляризации и 12 дБ для левосторонней круговой поляризации.

С практической точки зрения, разработанную рупорную антенну с питанием в виде щели можно применять в спутниковых антенных системах с поляризационной обработкой сигналов. Будущие исследования необходимо сфокусировать на усовершенствовании предложенной методики за счет улучшения коэффициента усиления.

Список использованных источников

- [1] O. Yu. Myronchuk et al., "Two-stage method for joint estimation of information symbols and channel frequency response in OFDM communication systems", *Radioelectron. Commun. Syst.*, vol. 63, no. 8, pp. 418-429, 2020.
doi: 10.3103/S073527272008004X.
- [2] O. Myronchuk et al., "Algorithm of channel frequency response estimation in orthogonal frequency division multiplexing systems based on Kalman filter", in *IEEE 15th Int. Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*. Lviv-Slavske, 2020.
doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235385.
- [3] А. Ю. Мирончук и др., "Метод оценивания частотной характеристики канала в OFDM системах на основе фильтрации и экстраполяции пилот-сигналов", *Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Радіотехніка, Радіоапаратобудування*, № 78, с. 36-42, 2019.
doi: 10.20535/RADAP.2019.78.36-42.
- [4] A. Bulashenko, S. Piltyay, A. Polishuk, and O. Bulashenko, "New traffic model of M2M technology in 5G wireless sensor networks", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*. Kyiv, 2020, pp. 125-131.
doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349305.
- [5] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Wireless sensor networks connectivity in heterogeneous 5G mobile systems", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. Kharkiv, 2020, pp. 508-513.
- [6] А. В. Булашенко, "Розподіл ресурсів для пристроїв малої потужності технології M2M в мережах 5G", *Наукові вісті КПІ*, вип. 3, с. 7-13, 2020.
doi: 10.20535/kpi-sn.2020.3.203863.
- [7] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Energy efficiency of the D2D direct connection system in 5G network", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. Kharkiv, 2020, pp. 324-329.
- [8] А. В. Булашенко, "Оцінка зв'язності D2D комунікацій у мережах 5G", *Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Радіотехніка, Радіоапаратобудування*, № 81, с. 21-29, 2020.
doi: 10.20535/RADAP.2020.81.21-29.
- [9] А. В. Булашенко, "Комбінований критерій вибору маршрутизації D2D технології", *Радіoeлектроніка, інформатика, управління*, № 1, с. 7-13, 2021.
doi: 10.15588/1607-3274-2021-1-1.
- [10] W. L. Stutzman, *Polarization in electromagnetic systems*. Norwood, Artech House, 2018.
- [11] M. Fartookzadeh, and S. H. M. Armakiat, "Design of metasurface polarization converter for near-field application; stacked conical horn antenna for circular polarization", *Int. Journal of RF and Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 7, p. e21712, 2019.
doi: 10.1002/MMCE.21712.
- [12] A. Densmore, Y. Rahmat-Samii, and G. Seck, "Corrugated-conical horn analysis using aperture field with quadratic phase", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 9, pp. 3453-3457, 2011.
doi: 10.1109/TAP.2011.2161552.
- [13] C. Granet, T. S. Bird and G. L. James, "Compact multimode horn with low side-lobes for global Earth coverage", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, no. 7, pp. 1125-1133, 2000.
doi: 10.1109/8.876332.
- [14] B. Guan, Y. Kuang, and Z. P. Chen, "Canceling the cross-polarization of the difference modes in a circular aperture multimode monopulse feed", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 12, pp. 6734-6741, 2018.
doi: 10.1109/TAP.2018.2869616.
- [15] F. Dubrovka et al., "Circularly polarised X-band H11- and H21-modes antenna feed for monopulse autotracking ground station", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*. Kharkiv, 2020, pp. 196-202.
doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252600.
- [16] J. Gmez et al., "Dual K-band/S-band tracking ground station antenna for future earth observation applications", in *2019 8th Int. Workshop on Tracking Telemetry and Command Systems for Space Applications*

- (TTC). Darmstadt, Germany, pp. 1-5, 2019. doi: 10.1109/TTC.2019.8895276.
- [17] S.-M. Hwang, and B.-C. Ahn, "New design method for a dual band waveguide iris polarizer", in *IEEE Int. Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies for Wireless Communications*, Hangzhou, 2007. doi: 10.1109/MAPE.2007.4393644.
- [18] Y. Liu, F. Li, H. Li, and H. He, "Design and optimization of wide and dual band waveguide polarizer", in *IEEE Global Symposium on Millimeter Wave*, Nanjing, China, 2008. doi: 10.1109/GSMM.2007.4393644.
- [19] S. I. Piltyay, O. Yu. Sushko, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Compact Ku-band iris polarizers for satellite telecommunication systems", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 19, pp. 1673-1690, 2020. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i19.10.
- [20] S. Piltyay et al., "Information resources economy in satellite systems based on new microwave polarizers with tunable posts", *Path of Science*, vol. 6, no. 11, pp. 5001-5010, 2020. doi: 10.22178/pos.55-1.
- [21] Г. С. Кушнір та ін., "Компактний хвильовий поляризатор із трьома प्रतिफазними штирями", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, вип. 5, с. 97-104, 2020. doi: 10.31649/1997-9266-2020-151-5-97-104.
- [22] Є. І. Калініченко та ін., "Регульований поляризатор на основі квадратного хвильоводу із діафрагмами та штирями", *Технічна інженерія*, вип. 86, № 2, с. 108-116, 2020. doi: 10.26642/ten-2020-2(86)-108-116.
- [23] B. Subbarao, and V. F. Fusco, "Compact coaxial-fed CP polarizer", *IEEE Antennas and Wireless Propagations Letters*, vol. 3, pp. 145-147, 2004. doi: 10.1109/LAWP.2004.831084.
- [24] F. F. Dubrovka et al., "A novel wideband coaxial polarizer", in *IEEE Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*. Odessa, 2013, pp. 473-474. doi: 10.1109/ICATT.2013.6650816.
- [25] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 5, p. 05024, 2020. doi: 10.21272/jnep.12(5).05024.
- [26] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Compact polarizers for satellite information systems", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. Kharkiv, 2020, pp. 350-355.
- [27] S. I. Piltyay et al., "Numerical performance of FEM and FDTD methods for the simulation of waveguide polarizers", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparaturbuduvannia*, vol. 84, pp. 11-21, 2021. doi: 10.20535/RADAP.2021.84.11-21.
- [28] S.-M. Hwang et al., "Study on design parameters of waveguide polarizer for satellite communication", in *IEEE Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation*. Singapore, 2012. doi: 10.1109/APCAP.2012.63332020.
- [29] Е. І. Калиніченко и др., "Высокоэффективный волноводный поляризатор для спутниковых информационных систем", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, вип. 4, с. 14-26, 2020. doi: 10.24025/2306-4412.4.2020.217129.
- [30] G. Virone et al., "Combined-phase-shift waveguide polarizer", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 8, pp. 509-511, 2008. doi: 10.1109/LMWC.2008.2001005.
- [31] A. A. Kirilenko, D. Yu. Kulik, and L. A. Rud, "Stepped approximation technique for designing coaxial waveguide polarizers", in *IX IEEE Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*, Odessa, 2013, pp. 470-472. doi: 10.1109/ICATT.2013.6650815.
- [32] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Analytical technique for iris polarizers development", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. Kharkiv, 2020, pp. 464-469.
- [33] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Analytical synthesis of waveguide iris polarizers", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 18, pp. 1579-1597, 2020. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i18.10.
- [34] A. V. Bulashenko, and S. I. Piltyay, "Equivalent microwave circuit technique for waveguide iris polarizers development", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparaturbuduvannia*, vol. 83, pp. 17-28, 2020. doi: 10.20535/RADAP.2020.83.17-28.

- [35] A. V. Bulashenko, S. I. Pilyay, and I. V. Demchenko, "Optimization of a polarizer based on a square waveguide with irises", *Science-Based Technologies*, vol. 47, no. 3, pp. 287-297, 2020. doi: 10.18372/2310-5461.47.14878.
- [36] A. V. Bulashenko, S. I. Pilyay, and I. V. Demchenko, "Wave matrix technique for waveguide iris polarizers simulation. Theory", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 6, p. 06026, 2020. doi: 10.21272/jnep.12(6).06026.
- [37] D. Yu. Kulik et al., "Compact-size polarization rotators on the basis of irises with rectangular slots", *Telecom. and Radio Engineering*, vol. 75, no. 1, pp. 1-9, 2016. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.10.
- [38] D. Yu. Kulik, S. A. Steshenko, and A. A. Kirilenko, "Compact polarization plane rotator at a given angle in the square rectangular waveguide", *Telecom. and Radio Engineering*, vol. 76, no. 1, pp. 855-864, 2017. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i10.20.
- [39] A. A. Kirilenko et al., "A tunable compact polarizer in a circular waveguide", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 2, pp. 592-596, 2019. doi: 10.1109/TMTT.2018.2881089.
- [40] A. Bulashenko, S. Pilyay, Ye. Kalinichenko, and O. Bulashenko, "Mathematical modeling of iris-post sections for waveguide filters, phase shifters and polarizers", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*. Kyiv, 2020, pp. 330-336. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349321.
- [41] S. Pilyay, A. Bulashenko, H. Kushnir, and O. Bulashenko, "New tunable iris-post square waveguide polarizers for satellite information systems", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*. Kyiv, 2020, pp. 132-137. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349357.
- [42] S. Pilyay, A. Bulashenko, Ye. Herhil, and O. Bulashenko, "FDTD and FEM simulation of microwave waveguide polarizers", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*. Kyiv, 2020, pp. 132-137. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349339.
- [43] L. A. Rud, and K. S. Shpachenko, "Polarizers on a segment of square waveguide with diagonally ridges and adjustment iris", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 55, no. 10, pp. 458-463, 2012. doi: 10.3103/S0735272712100044.
- [44] S. I. Pilyay, "Numerically effective basis functions in integral equation technique for sectoral coaxial ridged waveguides", in *14-th Int. Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory*, Kyiv, 2012, pp. 492-495. doi: 10.1109/MMET.2012.6331195.
- [45] F. F. Dubrovka, and S. I. Pilyay, "Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Numerical results", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 57, no. 2, pp. 59-69, 2014. doi: 10.3103/S0735272714020010.
- [46] S. I. Pilyay, and F. F. Dubrovka, "Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 1. Theory", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radioteknika Radioaparaturbuduvannia*, vol. 54, pp. 13-23, 2013. doi: 10.20535/RADAP.2013.54.13-23.
- [47] F. Dubrovka et al., "Prediction of eigenmodes cutoff frequencies of sectoral coaxial ridged waveguides", in *Int. Conf. on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Lviv, 2012, p. 191.
- [48] F. Dubrovka et al., "Boundary problem solution for eigenmodes in coaxial quad-ridged waveguides", *Information and Telecommunication Science*, vol. 5, no. 1, pp. 48-61, 2014. doi: 10.20535/2411-2976.12014.48-61.
- [49] F. Dubrovka et al., "Compact X-band stepped-thickness septum polarizer", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*. Kharkiv, 2020, pp. 135-138. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252583.
- [50] K. Al-Amoodi et al., "A compact substrate integrated waveguide notched-septum polarizer for 5G mobile device", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2517-2521, 2020. doi: 10.1109/LAWP.2020.3038404.
- [51] P. Sarasa, A. Baussois, and P. Regnier, "A compact single-horn C/X dual band and circular polarized Tx & Rx antenna system", in *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium*. Monterey, 2004. doi: 10.1109/APS.2004.1332019.
- [52] O. B. Jacobs, J. W. Odendaal, and J. Joubert, "Elliptically shaped quad-ridged horn antennas as feed for reflector", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 756-759, 2011. doi: 10.1109/LAWP.2011.2163050.

- [53] G. Mishra, S. K. Sharma, and J.-C. Chieh, "A circular polarized feed horn with inbuilt polarizer for offset reflector antenna for W-band CubeSat applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 3, pp. 1904-1909, 2018. doi: 10.1109/TAP.2018.2886704.
- [54] C. Shu et al., "A wideband dual-circular-polarization horn antenna for mmWave Wireless Communications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 9, pp. 1726-1730, 2019. doi: 10.1109/LAWP.2019.2927933.
- [55] N. Luo et al., "A millimeter-wave (V-band) dual-circular-polarized horn antenna based on an inbuilt monogroove polarizer", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 11, pp. 1933-1937, 2020. doi: 10.1109/TAP.2020.3015745.
- [56] H.-Y. Yu et al., "Wideband circularly polarized horn antenna exploiting open slotted end structure", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 267-271, 2020. doi: 10.1109/LAWP.2020.2964623.
- [57] J.-R. Qi et al., "Dual-band circular-polarization horn antenna with completely inhomogeneous corrugations", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 5, pp. 751-755, 2020. doi: 10.1109/LAWP.2020.2978878.
- [58] A. Caliskan, F. Gunes, and A. S. Turk, "Circularly polarized corrugated horn fed nonuniform reflectarray antenna", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*. Kharkiv, 2020. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252806.
- [59] K. Lu, K. W. Leung, and N. Yang, "3-D-printed circularly polarized twisted-ridge horn antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 3, pp. 1746-1750, 2021. doi: 10.1109/TAP.2020.3031764.
- [60] S. V. Yadav, and A. Chittora, "Circularly polarized high-power antenna with higher-order mode excitation", *Int. Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 1, pp. 1-5, 2021. doi: 10.1017/S1759078721000611.
- [61] C. A. Balanis, *Antenna theory: Analysis and design*, Hoboken, John Wiley and Sons, 2005.
- ## References
- [1] O. Yu. Myronchuk et al., "Two-stage method for joint estimation of information symbols and channel frequency response in OFDM communication systems", *Radioelectron. Commun. Syst.*, vol. 63, no. 8, pp. 418-429, 2020. doi: 10.3103/S073527272008004X.
- [2] O. Myronchuk et al., "Algorithm of channel frequency response estimation in orthogonal frequency division multiplexing systems based on Kalman filter", in *IEEE 15th Int. Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*. Lviv-Slavske, 2020. doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235385.
- [3] A. Yu. Myronchuk et al., "Channel frequency response estimation method based on pilot's filtration and extrapolation", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparaturbuduvannia*, no. 78, pp. 36-42, 2019 [in Russian]. doi: 10.20535/RADAP.2019.78.36-42.
- [4] A. Bulashenko, S. Piltyay, A. Polishuk, and O. Bulashenko, "New traffic model of M2M technology in 5G wireless sensor networks", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*. Kyiv, 2020, pp. 125-131. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349305.
- [5] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Wireless sensor networks connectivity in heterogeneous 5G mobile systems", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. Kharkiv, 2020, pp. 508-513.
- [6] A. V. Bulashenko, "Resource allocation for low-power devices of M2M technology in 5G networks", *Naukovi visti KPI*, vol. 3, pp. 7-13, 2020 [in Ukrainian]. doi: 10.20535/kpi-sn.2020.3.203863
- [7] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Energy efficiency of the D2D direct connection system in 5G network", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. Kharkiv, 2020, pp. 324-329.
- [8] A. V. Bulashenko, "Evaluation of D2D communications in 5G networks", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparaturbuduvannia*, no. 81, pp. 21-29, 2020 [in Ukrainian]. doi: 10.20535/RADAP.2020.81.21-29.

- [9] A. V. Bulashenko, "Combined criterion for the choice of routing based on D2D technology", *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, no. 1, pp. 7-13, 2021 [in Ukrainian]. doi: 10.15588/1607-3274-2021-1-1.
- [10] W. L. Stutzman, *Polarization in electromagnetic systems*. Norwood, Artech House, 2018.
- [11] M. Fartookzadeh, and S. H. M. Armakiat, "Design of metasurface polarization converter for near-field application; stacked conical horn antenna for circular polarization", *Int. Journal of RF and Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 7, p. e21712, 2019. doi: 10.1002/MMCE.21712.
- [12] A. Densmore, Y. Rahmat-Samii, and G. Seck, "Corrugated-conical horn analysis using aperture field with quadratic phase", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 9, pp. 3453-3457, 2011. doi: 10.1109/TAP.2011.2161552.
- [13] C. Granet, T. S. Bird and G. L. James, "Compact multimode horn with low side-lobes for global Earth coverage", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, no. 7, pp. 1125-1133, 2000. doi: 10.1109/8.876332.
- [14] B. Guan, Y. Kuang, and Z. P. Chen, "Canceling the cross-polarization of the difference modes in a circular aperture multimode monopulse feed", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 12, pp. 6734-6741, 2018. doi: 10.1109/TAP.2018.2869616.
- [15] F. Dubrovka et al., "Circularly polarised X-band H11- and H21-modes antenna feed for monopulse autotracking ground station", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*. Kharkiv, 2020, pp. 196-202. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252600.
- [16] J. Gmez et al., "Dual K-band/S-band tracking ground station antenna for future earth observation applications", in *2019 8th Int. Workshop on Tracking Telemetry and Command Systems for Space Applications (TTC)*. Darmstadt, Germany, pp. 1-5, 2019. doi: 10.1109/TTC.2019.8895276.
- [17] S.-M. Hwang, and B.-C. Ahn, "New design method for a dual band waveguide iris polarizer", in *IEEE Int. Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies for Wireless Communications*, Hangzhou, 2007. doi: 10.1109/MAPE.2007.4393644.
- [18] Y. Liu, F. Li, H. Li, and H. He, "Design and optimization of wide and dual band waveguide polarizer", in *IEEE Global Symposium on Millimeter Wave*, Nanjing, China, 2008. doi: 10.1109/GSMM.2007.4393644.
- [19] S. I. Piltyay, O. Yu. Sushko, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Compact Ku-band iris polarizers for satellite telecommunication systems", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 19, pp. 1673-1690, 2020. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i19.10.
- [20] S. Piltyay et al., "Information resources economy in satellite systems based on new microwave polarizers with tunable posts", *Path of Science*, vol. 6, no. 11, pp. 5001-5010, 2020. doi: 10.22178/pos.55-1.
- [21] H. S. Kushnir et al., "Compact waveguide polarizer with three antiphase posts", *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, vol. 5, pp. 97-104, 2020 [in Ukrainian]. doi: 10.31649/1997-9266-2020-151-5-97-104.
- [22] Ye. I. Kalinichenko et al., "Adjustable polarizer based on a square waveguide with diaphragms and pins", *Tekhnichna inzheneriia*, vol. 86, no. 2, pp. 108-116, 2020 [in Ukrainian]. doi: 10.26642/ten-2020-2(86)-108-116.
- [23] B. Subbarao, and V. F. Fusco, "Compact coaxial-fed CP polarizer", *IEEE Antennas and Wireless Propagations Letters*, vol. 3, pp. 145-147, 2004. doi: 10.1109/LAWP.2004.831084.
- [24] F. F. Dubrovka et al., "A novel wideband coaxial polarizer", in *IEEE Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*. Odessa, 2013, pp. 473-474. doi: 10.1109/ICATT.2013.6650816.
- [25] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 5, p. 05024, 2020. doi: 10.21272/jnep.12(5).05024.
- [26] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Compact polarizers for satellite information systems", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. Kharkiv, 2020, pp. 350-355.
- [27] S. I. Piltyay et al., "Numerical performance of FEM and FDTD methods for the simula-

- tion of waveguide polarizers", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*, vol. 84, pp. 11-21, 2021. doi: 10.20535/RADAP.2021.84.11-21.
- [28] S.-M. Hwang et al., "Study on design parameters of waveguide polarizer for satellite communication", in *IEEE Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation*. Singapore, 2012. doi: 10.1109/APCAP.2012.63332020.
- [29] Ye. I. Kalinichenko et al., "High performance waveguide polarizer for satellite information systems", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu*, no. 4, pp. 14-26, 2020 [in Russian]. doi: 10.24025/2306-4412.4.2020.217129
- [30] G. Virone et al., "Combined-phase-shift waveguide polarizer", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 8, pp. 509-511, 2008. doi: 10.1109/LMWC.2008.2001005.
- [31] A. A. Kirilenko, D. Yu. Kulik, and L. A. Rud, "Stepped approximation technique for designing coaxial waveguide polarizers", in *IX IEEE Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*, Odessa, 2013, pp. 470-472. doi: 10.1109/ICATT.2013.6650815.
- [32] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Analytical technique for iris polarizers development", in *IEEE Int. Conf. on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. Kharkiv, 2020, pp. 464-469.
- [33] S. I. Piltyay, A. V. Bulashenko, and I. V. Demchenko, "Analytical synthesis of waveguide iris polarizers", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 79, no. 18, pp. 1579-1597, 2020. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i18.10.
- [34] A. V. Bulashenko, and S. I. Piltyay, "Equivalent microwave circuit technique for waveguide iris polarizers development", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*, vol. 83, pp. 17-28, 2020. doi: 10.20535/RADAP.2020.83.17-28.
- [35] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Optimization of a polarizer based on a square waveguide with irises", *Science-Based Technologies*, vol. 47, no. 3, pp. 287-297, 2020. doi: 10.18372/2310-5461.47.14878.
- [36] A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay, and I. V. Demchenko, "Wave matrix technique for waveguide iris polarizers simulation. Theory", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 12, no. 6, p. 06026, 2020. doi: 10.21272/jnep.12(6).06026.
- [37] D. Yu. Kulik et al., "Compact-size polarization rotators on the basis of irises with rectangular slots", *Telecom. and Radio Engineering*, vol. 75, no. 1, pp. 1-9, 2016. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.10.
- [38] D. Yu. Kulik, S. A. Steshenko, and A. A. Kirilenko, "Compact polarization plane rotator at a given angle in the square rectangular waveguide", *Telecom. and Radio Engineering*, vol. 76, no. 1, pp. 855-864, 2017. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i10.20.
- [39] A. A. Kirilenko et al., "A tunable compact polarizer in a circular waveguide", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 2, pp. 592-596, 2019. doi: 10.1109/TMTT.2018.2881089.
- [40] A. Bulashenko, S. Piltyay, Ye. Kalinichenko, and O. Bulashenko, "Mathematical modeling of iris-post sections for waveguide filters, phase shifters and polarizers", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*. Kyiv, 2020, pp. 330-336. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349321.
- [41] S. Piltyay, A. Bulashenko, H. Kushnir, and O. Bulashenko, "New tunable iris-post square waveguide polarizers for satellite information systems", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*. Kyiv, 2020, pp. 132-137. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349357.
- [42] S. Piltyay, A. Bulashenko, Ye. Herhil, and O. Bulashenko, "FDTD and FEM simulation of microwave waveguide polarizers", in *IEEE 2nd Int. Conf. on Advanced Trends in Information Theory*. Kyiv, 2020, pp. 132-137. doi: 10.1109/ATIT50783.2020.9349339.
- [43] L. A. Rud, and K. S. Shpachenko, "Polarizers on a segment of square waveguide with diagonally ridges and adjustment iris", *Radioelectronics and Communications Systems*, vol. 55, no. 10, pp. 458-463, 2012. doi: 10.3103/S0735272712100044.
- [44] S. I. Piltyay, "Numerically effective basis functions in integral equation technique for sectoral coaxial ridged waveguides", in *14-th Int. Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory*, Kyiv, 2012, pp. 492-495. doi: 10.1109/MMET.2012.6331195.

- [45] F. F. Dubrovka, and S. I. Piltyay, "Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Numerical results", *Radioelectronics and Comm. Systems*, vol. 57, no. 2, pp. 59-69, 2014.
doi: 10.3103/S0735272714020010.
- [46] S. I. Piltyay, and F. F. Dubrovka, "Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 1. Theory", *Visnyk NTUU KPI. Seriya: Radiotekhnika Radioaparato-buduvannia*, vol. 54, pp. 13-23, 2013.
doi: 10.20535/RADAP.2013.54.13-23.
- [47] F. Dubrovka et al., "Prediction of eigenmodes cutoff frequencies of sectoral coaxial ridged waveguides", in *Int. Conf. on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Lviv, 2012, p. 191.
- [48] F. Dubrovka et al., "Boundary problem solution for eigenmodes in coaxial quad-ridged waveguides", *Information and Telecommunication Science*, vol. 5, no. 1, pp. 48-61, 2014.
doi: 10.20535/2411-2976.12014.48-61.
- [49] F. Dubrovka et al., "Compact X-band stepped-thickness septum polarizer", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*. Kharkiv, 2020, pp. 135-138.
doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252583.
- [50] K. Al-Amoodi et al., "A compact substrate integrated waveguide notched-septum polarizer for 5G mobile device", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2517-2521, 2020.
doi: 10.1109/LAWP.2020.3038404.
- [51] P. Sarasa, A. Baussois, and P. Regnier, "A compact single-horn C/X dual band and circular polarized Tx & Rx antenna system", in *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium*. Monterey, 2004.
doi: 10.1109/APS.2004.1332019.
- [52] O. B. Jacobs, J. W. Odendaal, and J. Joubert, "Elliptically shaped quad-ridged horn antennas as feed for reflector", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 756-759, 2011.
doi: 10.1109/LAWP.2011.2163050.
- [53] G. Mishra, S. K. Sharma, and J.-C. Chieh, "A circular polarized feed horn with inbuilt polarizer for offset reflector antenna for W-band CubeSat applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 3, pp. 1904-1909, 2018.
doi: 10.1109/TAP.2018.2886704.
- [54] C. Shu et al., "A wideband dual-circular-polarization horn antenna for mmWave Wireless Communications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 9, pp. 1726-1730, 2019.
doi: 10.1109/LAWP.2019.2927933.
- [55] N. Luo et al., "A millimeter-wave (V-band) dual-circular-polarized horn antenna based on an inbuilt monogroove polarizer", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 11, pp. 1933-1937, 2020.
doi: 10.1109/TAP.2020.3015745.
- [56] H.-Y. Yu et al., "Wideband circularly polarized horn antenna exploiting open slotted end structure", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 267-271, 2020.
doi: 10.1109/LAWP.2020.2964623.
- [57] J.-R. Qi et al., "Dual-band circular-polarization horn antenna with completely inhomogeneous corrugations", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 5, pp. 751-755, 2020.
doi: 10.1109/LAWP.2020.2978878.
- [58] A. Caliskan, F. Gunes, and A. S. Turk, "Circularly polarized corrugated horn fed nonuniform reflectarray antenna", in *IEEE Ukrainian Microwave Week*. Kharkiv, 2020.
doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252806.
- [59] K. Lu, K. W. Leung, and N. Yang, "3-D-printed circularly polarized twisted-ridge horn antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 3, pp. 1746-1750, 2021.
doi: 10.1109/TAP.2020.3031764.
- [60] S. V. Yadav, and A. Chittora, "Circularly polarized high-power antenna with higher-order mode excitation", *Int. Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 1, pp. 1-5, 2021.
doi: 10.1017/S1759078721000611.
- [61] C. A. Balanis, *Antenna theory: Analysis and design*, Hoboken, John Wiley and Sons, 2005.

I. V. Zabegalov, *lecturer*,

e-mail: igor_zabegalov@meta.ua

Ya. E. Sharpan, *student*,

e-mail: yar_sharpan@rambler.ru

Ivan Kozhedub Shostka Professional College of Sumy State University

Institutska st., 1, Shostka, Sumy region, 41100, Ukraine

I. I. Dikhtyaruk, *student*,

e-mail: kotovan99@i.ua

S. I. Piltyay, *Ph.D., associate professor*,

e-mail: piltyay_stepan@ua.fm

A. V. Bulashenko, *senior lecturer*

e-mail: an_bulashenko@i.ua

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

Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

WAVEGUIDE POWER SUPPLY SYSTEM OF A HORN ANTENNA WITH CIRCULAR POLARIZATION

The article presents the methodology for developing and optimizing the power supply system of a horn antenna with circular polarization. A horn antenna has a metal structure and consists of a waveguide having a variable cross-section and an open radiating end. Electromagnetic waves in such antenna are excited by a waveguide that is connected to a narrow wall of the horn antenna. The proposed power system of the horn antenna consists of a rectangular waveguide with a slit. In order to obtain the excitation of signals with circular polarization at the output, the slit has been cut in a rectangular waveguide at an angle of 45°. As a result, the circuit makes it possible to generate the signals with right-hand circular polarization and left-hand circular polarization. The presented design of the horn antenna power supply system eliminates the need to develop a separate waveguide device for forming a circular polarization. The designed power system for horn antenna with circular polarization can be used at an operating frequency of 8.0 GHz. At these frequencies the reflection coefficient is less than -19 dB. The proposed horn antenna provides a maximum value of the gain of 21 dB for right-hand circular polarization and a maximum value of the gain of 10 dB for left-hand circular polarization. Cross-polarization isolation is higher than 10 dB. Therefore, the developed power system of the horn antenna provides a narrowband operating mode at the circular polarization with satisfactory electromagnetic polarization characteristics and matching at the frequency of 8 GHz. The developed power supply system of the horn antenna with circular polarization can be used in radio engineering systems, which carry out polarization processing of signals.

Keywords: *circular polarization, horn antenna, waveguide, slit, gain, radiation pattern.*

І. В. Забегалов, викладач,
e-mail: igor_zabegalov@meta.ua

Я. Е. Шарпан, студент,
e-mail: yar_sharpan@rambler.ru

Шосткінський фаховий коледж імені Івана Кожедуба Сумського державного університету
вул. Інститутська, 1, м. Шостка, Сумська обл., 41100, Україна

І. І. Діхтярук, студент,
e-mail: kotovan99@i.ua

С. І. Пільтяй, к.т.н., доцент,
e-mail: piltyay_stepan@ua.fm

А. В. Булашенко, ст. викладач
e-mail: an_bulashenko@i.ua

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

ХВИЛЕВІДНА СИСТЕМА ЖИВЛЕННЯ РУПОРНОЇ АНТЕНИ З КОЛОВОЮ ПОЛЯРИЗАЦІЄЮ

У статті наведено методику розробки та оптимізації системи живлення рупорної антени із коловою поляризацією. Рупорна антена має металеву конструкцію та складається із хвилеводу, що має змінний переріз і відкритий випромінюючий кінець. Електромагнітні хвилі у такій антені збуджують за допомогою хвилеводу, який вмикають до вузької стінки рупорної антени. Запропонована система живлення рупорної антени складається з прямокутного хвилеводу зі щілиною. Щоб на виході отримати в рупорній антені збудження сигналів із коловою поляризацією, щілину було вирізано у прямокутному хвилеводі під кутом 45° . В результаті схема дає можливість формувати сигнали з правою круговою поляризацією та лівою круговою поляризацією. Представлена конструкція системи живлення рупорної антени усуває необхідність розробки окремо хвильовідного пристрою формування колової поляризації. Спроектована система живлення рупорної антени із коловою поляризацією може використовуватися на робочій частоті 8 ГГц. На ній коефіцієнт відбиття є нижчим за -19 дБ. Запропонована рупорна антенна забезпечує максимальне значення коефіцієнта підсилення 21 дБ для правої колової поляризації та максимальне значення коефіцієнта підсилення 10 дБ для лівої колової поляризації. Кросполяризаційна розв'язка перевищує 10 дБ. Таким чином, розроблена система живлення рупорної антени забезпечує вузькосмуговий режим роботи на коловій поляризації із задовільними електромагнітними поляризаційними характеристиками та узгодженням на частоті 8 ГГц. Розроблена система живлення рупорної антени з коловою поляризацією може використовуватися у радіотехнічних системах, які здійснюють поляризаційне оброблення сигналів.

Ключові слова: колова поляризація, рупорна антена, хвильовід, щілина, коефіцієнт підсилення, діаграма спрямованості.

[0000-0002-9300-8911] **С. В. Ромашко,***завідувач сектору автотехнічних досліджень,*[0000-0001-7019-0602] **В. Б. Харенко,***судовий експерт сектору автотехнічних досліджень*

Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України

вул. Пастерівська, 104, м. Черкаси, 18009, Україна

[0000-0002-8640-879X]

В. В. Литовченко, аспірант

[0000-0002-5881-9217]

М. В. Підгорний, к.т.н., доцент,*декан факультету комп'ютеризованих технологій машинобудування і дизайну*

Черкаський державний технологічний університет

б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

МОДЕЛІ РУХУ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ПРИ ПЕРЕХРЕСНИХ ЗІТКНЕННЯХ

Зіткнення транспортних засобів є найбільш небезпечним видом дорожньо-транспортної пригоди (ДТП) за кількістю жертв і розмірами матеріальних збитків. При розслідуванні ДТП, пов'язаних із перехресними зіткненнями, виникає необхідність встановлення механізму дорожньо-транспортної пригоди, а також встановлення, який з автомобілів, що зіткнулися, першим виїхав на перехрестя. Це можливо за умови дослідження моделей руху автотранспортних засобів. У статті запропоновано підходи для удосконалення методики автотехнічної експертизи при перехресних зіткненнях.

Ключові слова: *автомобіль, зіткнення, ДТП, перехрестя, дослідження, судова експертиза.*

Вступ. Практика розслідування дорожньо-транспортних пригод (ДТП) свідчить, що в зв'язку зі специфічністю цієї категорії кримінальних справ одним із основних джерел доказів є висновок автотехнічної експертизи, яка сьогодні ґрунтується на використанні інформаційних технологій та технічних засобів (ТЗ).

Причини виникнення ДТП – результат дії двох або більше активних складових – порушень правил безпеки руху, що створюють інтегративну цілісну систему.

Механізм дорожньо-транспортної пригоди – це комплекс пов'язаних об'єктивними закономірностями обставин, які визначають процес зближення ТЗ з перешкодою перед зіткненням, взаємодію його з перешкодою при зіткненні і подальший рух ТЗ та інших відокремлених ударом об'єктів до зупинки [4].

Під зіткненням транспортних засобів розуміється подія, що виникла в результаті взаємного контакту механічних транспортних засобів в процесі їх руху і спричинила загибель або тілесні ушкодження людей, пошкодження транспортних засобів, споруд, вантажів або інший матеріальний збиток [2].

У процесі зіткнень автомобілі, пасажир і водії піддаються дії ударних навантажень, які діють протягом короткого проміжку часу, але вплив таких навантажень є досить значним.

Класифікація видів зіткнень транспортних засобів, що відповідає потребам автотехнічної експертизи, повинна сприяти найбільш повній розробці методики експертного дослідження обставин, які визначають механізм зіткнення. Існують різні класифікації видів зіткнень транспортних засобів, які представлені в роботах таких дослідників, як В. А. Іларіонов [3], Ю. Г. Корухов [6], С. А. Євтюков, Я. В. Васильєв [7], Ю. Б. Суворов [8], Е. Р. Домке [1], Kenneth R. Agent та Jerry G. Pigman [10], Н. Ward Smith [11], В. В. Столяров [14].

Можливі варіанти видів зіткнень транспортних засобів досить вичерпно, на нашу думку, представлені в роботі Ю. Г. Корухова [6]. Спираючись на зазначену класифікацію видів зіткнень, подальше дослідження ми проводимо за алгоритмом, що відповідає закладеним у цій класифікації можливим варіантам зіткнення ТЗ.

Метою статті є моделювання механізму перехресного зіткнення транспортних засобів і дослідження особливостей їх руху для встановлення характеристик динаміки цього процесу при зіткненнях, що необхідно для вдосконалення методики з'ясування обставин ДТП при перехресному зіткненні.

Виклад основного матеріалу. За даними американської дослідницької групи Корнелівської лабораторії аеронавтики, на зустрічні зіткнення припадає 56,5 % від загальної кількості ДТП, попутні – 7,8 %, перехресні зіткнення становлять 35,7 % [5]. Дані зображено на рисунку 1.

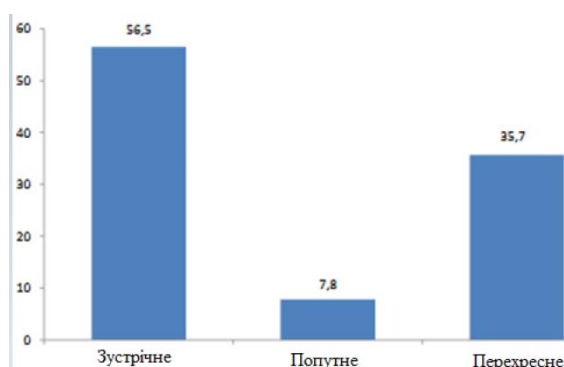


Рисунок 1 – Розподілення кількості ДТП за видами, %

Наводиться за: [5]

Зіткнення транспортних засобів є найбільш небезпечним видом ДТП за кількістю жертв і розмірами матеріальних збитків [3].

Причини зіткнень – обставини, які створили дорожню обстановку, в якій водій вчасно не виявив небезпеку зіткнення і не вжив необхідних заходів для його запобігання. Причини, що призводять до зіткнення транспортних засобів [2]:

- несправності транспортних засобів, що призводять до зміни напрямку руху або позбавляють водія зробити наступні дії: знизити швидкість, зупинитися, зробити об'їзд перешкоди;

- несприятливі дорожні умови, які призводять до безпідставної зміни напрямку руху транспортних засобів або втрати керованості (слизька проїжджа частина, різні значення коефіцієнта зчеплення під колесами);

- несприятлива дорожня обстановка. У смузі руху транспортних засобів виникає перешкода, при якій водій змушений застосу-

вати різкий маневр або гальмування, що призводить до втрати керованості транспортних засобів і виїзду «в небезпечному напрямку»;

- дії водіїв, які не відповідають вимогам Правил дорожнього руху і створюють небезпеку або перешкоду іншим учасникам руху;

- застосування прийомів управління, що призводять до втрати керованості транспортних засобів (різке гальмування при здійсненні повороту або на слизькій дорозі, крутий поворот рульового колеса при виїзді з колії);

- інші (неправильна організація руху, незадовільна видимість дорожніх знаків або їх відсутність).

Процес удару при зіткненнях поділяють на три фази [1, 4].

Перша фаза триває від моменту зіткнення тіл до моменту їх найбільшого зближення. Тривалість першої фази становить 0,05...0,10 с.

Друга фаза триває від моменту найбільшого зближення до моменту роз'єднання тіл. Тривалість другої фази становить 0,02...0,04 с.

Третя фаза – відкидання, рух після зіткнення.

Характеристика першої фази полягає в переході кінетичної енергії тіл в механічну енергію руйнування та деформацій деталей, а також в потенційну енергію і тепло. У другій фазі удару потенційна енергія пружних частин, деформованих у процесі зближення тіл, знову переходить у кінетичну енергію, сприяючи роз'єднанню тіл.

В процесі автотехнічної експертизи при дослідженні зіткнень актуальним є вироблення технології (з добorem сучасного інструментарію) для встановлення механізму дорожньо-транспортної пригоди. Для відновлення механізму зіткнення транспортних засобів необхідно визначити місце ДТП, взаємне розташування транспортних засобів у момент удару, розташування на дорозі, швидкості транспортних засобів перед зіткненням. Методика експертного дослідження при встановленні механізму зіткнення залежить від виду зіткнення, що визначається характером удару: блокуюче, ковзаюче, дотичне.

Принцип модельованості полягає в тому, що складна система (ДТП) може бути представлена скінченною множиною моделей, які дають можливість досліджувати окремі

властивості або систему в цілому. Реалізація цього принципу в процесі створення інформаційних технологій на АТ дає змогу на ранніх етапах ЖЦ (НДР, проектування) отримати предметно-орієнтовані моделі об'єктів, процесів та їх властивостей, а також досліджувати їх поведінку з урахуванням різних аспектів функціонування в реальному фізичному середовищі [13].

Перехресні зіткнення поділяють на прямі та косі [12]. Прямі зіткнення – зіткнення при паралельному розташуванні поздовжньої або поперечної осі одного ТЗ та поздовжньої осі іншого (кут α_0 дорівнює $0...90^\circ$). Косі зіткнення – зіткнення, при яких поздовжні осі ТЗ розташувалися відносно одна одної під гострим кутом (кут α_0 не дорівнює $0...90^\circ$).

На рисунках 2, 3 зображено схеми прямого та косого зіткнення двох транспортних засобів.

У дорожньо-транспортних пригодах при перехресних зіткненнях транспортні засоби здійснюють складні рухи (автомобілі переміщуються відносно один одного і далеко роз'їжджаються від місця події). Робота, здійснена в процесі взаємодії транспортних засобів, визначається сумою робіт поступального і обертального руху.

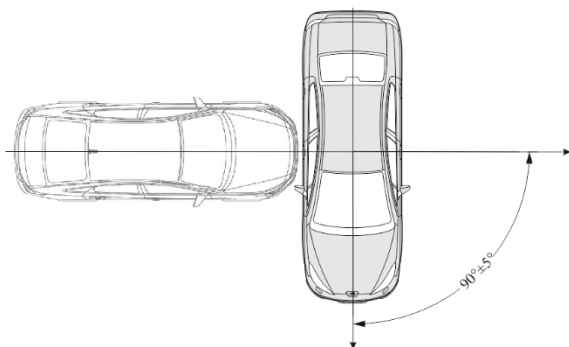


Рисунок 2 – Вигляд прямого зіткнення
(зображення з транспортно-трасологічної експертизи, коли кут між поздовжніми осями транспортних засобів становить $90^\circ \pm 5^\circ$)

Пряма, що проходить через точку дотику автомобілів при їх зіткненні, спрямована паралельно відносній швидкості їх центрів тяжіння на початку зіткнення, зазвичай, називається лінією удару. Це поняття має істотне значення, адже саме по лінії удару діє ударний імпульс при зіткненні автомобілів.

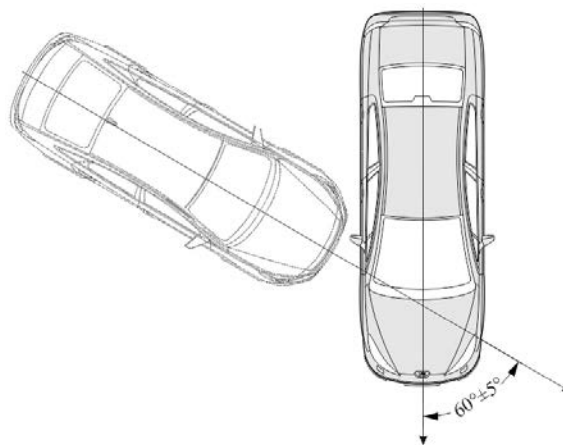


Рисунок 3 – Вигляд косого зіткнення
(зображення з транспортно-трасологічної експертизи, коли кут між поздовжніми осями транспортних засобів становить $60^\circ \pm 5^\circ$)

Тому, залежно від того, як проходить лінія удару, ми розрізняємо види зіткнень. Зіткнення називається центральним, якщо лінія удару проходить через центри ваги автомобілів, в іншому випадку воно буде ексцентричним. Варто мати на увазі, що напрям лінії удару при зіткненні автомобілів залежить не тільки від напрямку руху, а й від величини швидкості руху кожного з них. Якщо швидкості руху автомобілів різні, то лінія удару буде розташована під меншим кутом до поздовжньої осі того з них, який перед зіткненням мав більшу швидкість (рисунки 4, 5) [4].

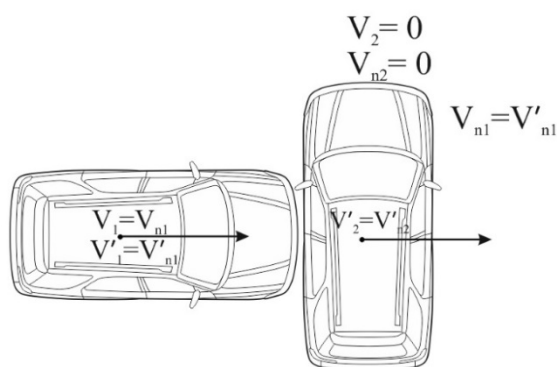


Рисунок 4 – Кінематика зіткнення автомобілів при прямому зіткненні

(V_{n1} та V_{n2} – проекції швидкостей на лінію удару першого та другого автомобіля перед зіткненням, м/с; V_{n1}^1 та V_{n2}^2 – проекції швидкостей на лінію удару першого та другого автомобіля після зіткнення, м/с)

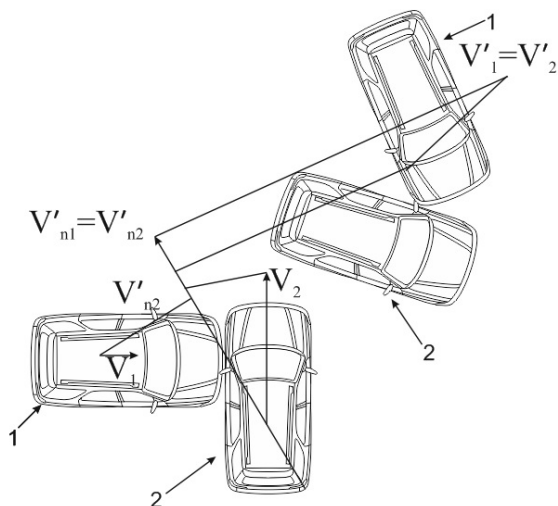


Рисунок 5 – Кінематика зіткнення автомобілів при косому зіткненні

Урахування роботи тертя шин на дорозі дає можливість отримати достовірність події та зробити правильний висновок стосовно дій учасників дорожнього руху. Приклад методу розрахунку обертання ТЗ_а при обертвовому русі на величину затрат кінетичної енергії наведено в [2, 12]. Обертання ТЗ_п можна розрахувати за кутом між поздовжніми осями автомобіля на момент зіткнення та після нього – спосіб, що використовується в експертній практиці (рисунок 6).

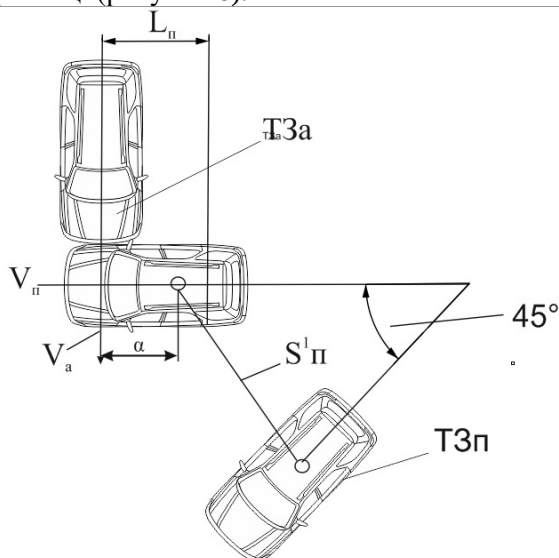


Рисунок 6 – Схема положення ТЗ_п до та після зіткнення

(ТЗ_а – транспортний засіб, який завдає удару, ТЗ_п – транспортний засіб, який отримує удар, V_а – швидкість ТЗ_а на момент удару, V_п – швидкість ТЗ_п на момент удару, Sn¹ – швидкість переміщення центру мас ТЗ_п після удару, L_п – база ТЗ_п)

Пережесні зіткнення в більшості своїй характеризуються зіткненнями, що відбуваються під прямим кутом.

Потрібно визначити, з якими швидкостями рухалися автомобілі після зіткнення, перед зіткненням, перед початком гальмування. Положення автомобілів після зіткнення визначається кутами θ та γ .

Швидкості автомобілів після зіткнення (рисунок 7):

$$V_5 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \varphi \cdot S_3}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

$$V_6 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \varphi \cdot S_4}, \text{ м/с}. \quad (2)$$

Для того щоб визначити швидкості автомобілів перед зіткненням, необхідно скласти рівняння збереження кількості руху. Кількість руху – величина векторна. Розкладемо кількість руху за напрямками на «х» і «у», тобто на дві складові, що збігаються з напрямком руху автомобілів до зіткнення:

- У напрямку осі «х»

$$m_1 \cdot V_3 = m_1 \cdot V_5 \cdot \cos\theta + m_2 \cdot V_6 \cdot \cos\gamma. \quad (3)$$

- У напрямку осі «у»

$$m_2 \cdot V_4 = m_1 \cdot V_5 \cdot \sin\theta + m_2 \cdot V_6 \cdot \sin\gamma. \quad (4)$$

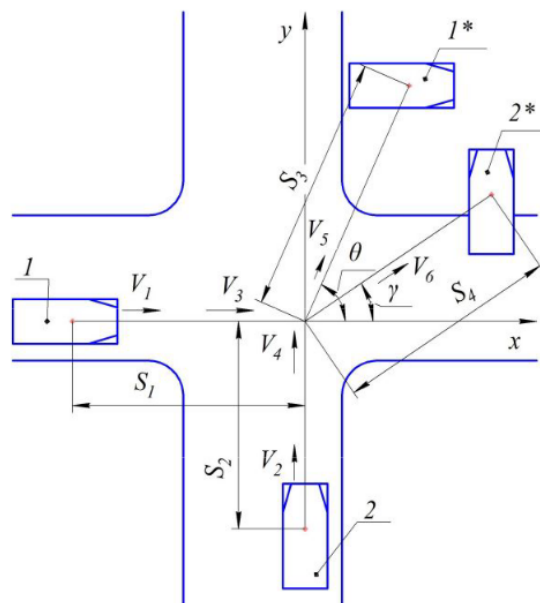


Рисунок 7 – Пережесні зіткнення автомобілів

(1, 2 – положення автомобілів на початку гальмування перед зіткненням; 1*, 2* – положення автомобілів після зупинки; S₁, S₂ – сліди ковзання автомобілів перед зіткненням; S₃, S₄ – відстань переміщення центрів тяжіння автомобілів після зіткнення; V₁, V₂ – швидкості автомобілів на початку гальмування; V₃, V₄ – швидкості автомобілів перед зіткненням; V₅, V₆ – швидкості автомобілів після зіткнення)

Швидкості автомобілів на початку гальмування:

$$V_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \varphi \cdot S_1 + V_3^2}, \text{ м/с}, \quad (5)$$

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \varphi \cdot S_2 + V_4^2}, \text{ м/с}. \quad (6)$$

Визначення моменту виїзду автомобіля на перехрестя. При розслідуванні ДТП, пов'язаних з перехресними зіткненнями, виникає необхідність встановити, який з автомобілів, що зіткнулися, першим виїхав на перехрестя [14, 15]. В цьому випадку можливі наступні варіанти (рисунок 8):

Варіант 1. Обидва автомобілі виїжджають на перехрестя з постійною швидкістю (без гальмування).

Час, який знадобився кожному автомобілю для проїзду від границі перехрестя до місця зіткнення:

$$t_1 = \frac{S_1}{V_1}, \text{ с}; \quad (7)$$

$$t_2 = \frac{S_2}{V_2}, \text{ с}; \quad (8)$$

де S_1 та S_2 – відстань від місця зіткнення до границі перехрестя, м;

V_1 та V_2 – швидкості автомобілів перед зіткненням, м/с.

Якщо $t_1 > t_2$, то автомобіль 1 виїхав на перехрестя раніше, ніж автомобіль 2, і навпаки.

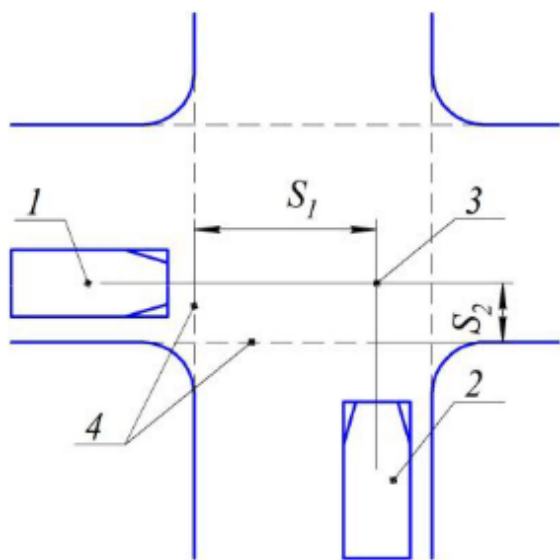


Рисунок 8 – Визначення моменту виїзду автомобілів на перехрестя при перехресному зіткненні

(1, 2 – автомобілі 1 та 2; 3 – місце зіткнення; 4 – границі перехрестя)

Варіант 2. Автомобіль 1 виїжджає на перехрестя з постійною швидкістю, а автомобіль 2 – при гальмуванні.

Час, який знадобився кожному автомобілю для проїзду від границі перехрестя до місця зіткнення:

$$t_1 = \frac{S_1}{V_1}, \text{ с}; \quad (9)$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot \varphi \cdot S_2} - V_2}{g \cdot \varphi}. \quad (10)$$

Варіант 3. Обидва автомобілі виїжджають на перехрестя з гальмуванням.

Час, який знадобиться кожному автомобілю для проїзду від границі перехрестя до місця зіткнення:

$$t_1 = \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot \varphi \cdot S_1} - V_1}{g \cdot \varphi}. \quad (11)$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot \varphi \cdot S_2} - V_2}{g \cdot \varphi}. \quad (12)$$

Результати досліджень. Проаналізувавши цей метод розрахунків [1], встановлено, що він є не повною мірою ефективним і не дає можливості в повному обсязі дослідити обставини ДТП.

Для цього авторами пропонується метод розрахунків, який є доцільним для використання в експертній практиці НДЕКЦ в Черкаській області. Розглянемо зазначений метод на прикладі.

На нерегульованому та рівнозначному перехресті сталося зіткнення між автомобілями Toyota RAV4 та ВАЗ 2109. У Toyota RAV4 знаходились два пасажирів, які отримали тілесні ушкодження. Дорожнє покриття – мокрий асфальт. Потребується визначити швидкість руху автомобілів перед зіткненням. Схему ДТП зображено на рисунку 9 [9].

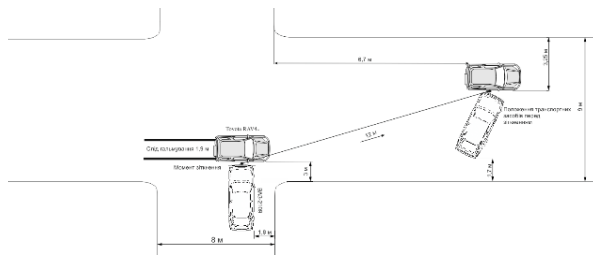


Рисунок 9 – Схема ДТП

Оскільки після зіткнення автомобілі рухались разом як одне ціле з однаковою швидкістю, доходимо висновку, що зіткнення мало характер непружного удару та було косим, ексцентричним. Все це встановлюється на основі протоколу огляду транспорту та інших матеріалів справи.

Варто сказати, що при зіткненні автомобілів, які мають непружний удар, у разі правильного визначення коефіцієнта зчеплення розрахунки проводяться більш точно, оскі-

льки тут завідомо відомо, що коефіцієнт відновлення дорівнює нулю.

Для полегшення пошуку рішення задачі проводимо вісі координат, початок яких розміщуємо у точці зіткнення автомобілів. При цьому вісь X направляємо за напрямком руху автомобіля Toyota RAV4 до зіткнення, вісь Y – за напрямком руху автомобіля ВАЗ 2109 (рисунок 10).

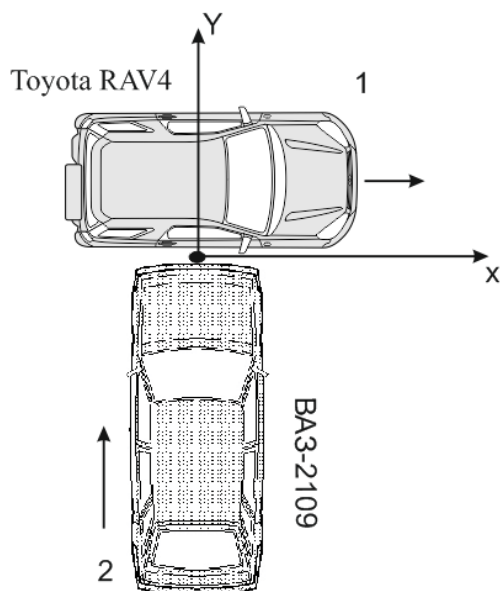


Рисунок 10 – Схема зіткнення автомобілів

На основі теореми про збереження кількості руху для автомобілів Toyota RAV4 та ВАЗ 2109 в проекції на вісь X маємо:

$$m_1 V_{1x} + m_2 V_{2x} = (m_1 + m_2) \cdot V'_{1,2x}. \quad (13)$$

В проекції на вісь Y :

$$m_1 V_{1y} + m_2 V_{2y} = (m_1 + m_2) \cdot V'_{1,2y}, \quad (14)$$

де V_{1x} – швидкість руху автомобіля Toyota RAV4 безпосередньо перед зіткненням уздовж осі X ;

$V_{2x} = 0$ – швидкість руху автомобіля ВАЗ 2109 безпосередньо перед зіткненням уздовж осі X ;

$V_{1y} = 0$ – швидкість руху автомобіля Toyota RAV4 безпосередньо перед зіткненням уздовж осі Y ;

V_{2y} – швидкість руху автомобіля ВАЗ 2109 безпосередньо перед зіткненням уздовж осі Y ;

$V_{1,2x}$ – спільна початкова швидкість руху автомобілів Toyota RAV4 та ВАЗ 2109 після зіткнення або в момент найбільшого зближення зазначених автомобілів уздовж осі X ;

$V_{1,2y}$ – спільна початкова швидкість руху автомобілів Toyota RAV4 та ВАЗ 2109 після зіткнення або в момент найбільшого зближення зазначених автомобілів уздовж осі Y ;

m_1 – маса автомобіля Toyota RAV4;

m_2 – маса автомобіля ВАЗ 2109.

Таким чином, теорема про збереження кількості руху в цьому випадку може бути виражена в наступному вигляді:

$$m_1 V_{1x} = (m_1 + m_2) \cdot V'_{1,2x}; \quad (15)$$

$$m_2 V_{1x} = (m_1 + m_2) \cdot V'_{1,2y}. \quad (16)$$

Швидкість руху автомобілів після зіткнення визначається з умови, що кінетична енергія, яка залишилася, була витрачена на переміщення автомобілів:

$$\frac{(m_1 + m_2) \cdot V_{1,2}^2}{2} = (m_1 + m_2) g \varphi_6 \cdot S, \quad (17)$$

де $V_{1,2}$ – спільна початкова швидкість руху автомобілів після зіткнення, м/с;

$S = 12$ м – відстань, яку подолали автомобілі після зіткнення;

$\varphi_6 = 0,3$ – коефіцієнт зчеплення (бокове ковзання на мокрому асфальті).

Із рівняння (17) отримуємо наступну формулу:

$$V_{1,2} = \sqrt{2g\varphi_6 S} \text{ м/с}; \quad (18)$$

$$V'_{1,2x} = V_{1,2} \cos \alpha = \sqrt{2g\varphi_6 S} \cdot \cos \alpha \text{ м/с}; \quad (19)$$

$$V'_{1,2y} = V_{1,2} \sin \alpha = \sqrt{2g\varphi_6 S} \cdot \sin \alpha. \quad (20)$$

При підстановці в рівняння формул (15) та (16) значення швидкостей руху відповідно з рівнянь (19) та (20) отримуємо такі формули для визначення швидкостей руху автомобілів перед зіткненням:

$$V_{1x} = \frac{C_1 + G_2}{G_1} \cdot \cos \alpha \sqrt{2g\varphi_6 S} \text{ м/с}; \quad (21)$$

$$V_{1y} = \frac{C_1 + G_2}{G_2} \cdot \sin \alpha \sqrt{2g\varphi_6 S} \text{ м/с}, \quad (22)$$

де $G_1 = 1685$ кг – вага автомобіля Toyota RAV4 з водієм та двома пасажирями;

$G_2 = 1065$ кг – вага автомобіля ВАЗ 2109 з водієм.

Кут α між віссю X та напрямком руху автомобілів після зіткнення знаходимо, виходячи з умови, що від місця зіткнення до місця зупинки автомобілі перемістилися у напрямку осі Y на відстань 2,75 м. Ця відстань визначається на основі схеми ДТП наступним чином:

$$\sin \alpha = \sqrt{\frac{a}{S}} = \sqrt{\frac{2,75}{12}} = 0,229, \quad (23)$$

$$\alpha = 13^\circ 18',$$

де $a = 2,75$ – відстань, на яку змістились автомобілі від місця зіткнення уздовж осі Y ;

$S = 12$ м – відстань, пройдена автомобілями після зіткнення;

$$\cos \alpha = \sin(90^\circ - \alpha) = \sin(90^\circ - 13^\circ 18') = 0,9732. \quad (24)$$

Таким чином, швидкість руху автомобіля Toyota RAV4 перед зіткненням була близько 48 км/год:

$$V_{1x} = 3,6 \frac{1685+1065}{1685} \cdot 0,9732 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,3 \cdot 12} = 48 \text{ км/год}. \quad (25)$$

Швидкість руху автомобіля ВАЗ 2109 перед зіткненням була близько 18 км/год:

$$V_{1y} = 3,6 \frac{1685+1065}{1065} \cdot 0,9732 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,3 \cdot 12} = 18 \text{ км/год}. \quad (26)$$

Як видно зі схеми ДТП, перед зіткненням автомобіль Toyota RAV4 рухався в загальмованому стані на відстані 5,2 м. В цьому випадку його швидкість руху перед початком зіткнення розраховується за формулою

$$V_0 = 1,8 \cdot 0,1 \frac{9,81 \cdot 0,4}{1,0} + \sqrt{\frac{254 \cdot 0,4 \cdot 5,2}{1,0}} + 48_2 = 54 \text{ км/год}, \quad (27)$$

де $t_3 = 0,1$ с – час наростання сповільнення;

$\varphi = 0,4$ – коефіцієнт зчеплення;

$S_4 = S_0 + L = 7,9 - 2,7 = 5,2$ м – довжина сліду гальмування задніх коліс;

$S_4^0 = 7,9$ м – загальна довжина сліду гальмування;

$L = 2,7$ – база автомобіля Toyota RAV4;

$V_{1x} = 48$ км/год – швидкість руху автомобіля Toyota RAV4 перед зіткненням.

Отже, швидкість руху автомобіля Toyota RAV4 перед початком гальмування була близько 54 км/год.

Положення автомобілів після зіткнення свідчить про те, що, рухаючись разом, вони розгорнулись на деякий кут, тобто при русі після зіткнення водночас з лінійною швидкістю мали незначну кутову швидкість. Однак навіть при ретельному обліку витрати енергії на невеликий розворот не більші, ніж на 0,5 км/год. Якщо кут розвертання автомобілів після зіткнення більший 90° , то витрату енергії на розвертання необхідно враховувати.

Обговорення результатів та перспективи подальших досліджень. Оскільки метою експертного дослідження механізму при-

годи є встановлення даних, які дають можливість оцінити дії водія по запобіганню настанню шкідливих наслідків, основне значення має встановлення того, що трапилось у першій стадії механізму пригоди, тобто коли водій міг і повинен був оцінити дорожню обстановку як небезпечну та вжити необхідних заходів.

Принцип логіко-інформаційної реалізації дослідження ДТП застосовується до поданої задачі в послідовній реалізації стратегій «з минулого в сьогодення» (аналіз) та «із сьогодення в майбутнє» (синтез) [13]. Розглядаючи окремі етапи інформатизації експертних досліджень, ми простежуємо діалектичну спіраль розвитку об'єктів, процесів і систем інформатики, керування процесами їх розробки, виготовлення й експлуатації. Перший виток діалектичної спіралі забезпечує інформаційний зв'язок між функціонуванням процесів, об'єктів і систем інформатизації в минулому й НДЄКЦ, організаціями та установами, що забезпечують створення й удосконалювання в майбутньому.

Висновки. У статті за допомогою моделювання і встановлення характеристик динаміки процесів при перехресному зіткненні ТЗ з'ясовано механізми зіткнення при перехресних ДТП, окреслено питання вдосконалення технології досліджень в ході експертизи, які мають значення та впливають на висновок при проведенні автотехнічної експертизи, а також вдосконалено метод розрахунків швидкості руху ТЗ при перехресному зіткненні. Застосувавши запропонований метод, визначають, з якими швидкостями рухалися автомобілі після зіткнення, перед зіткненням, перед початком гальмування. Положення автомобілів після зіткнення визначається кутами θ та γ . Зазначений метод дає можливість його подальшої реалізації засобами обчислювальної техніки.

Список використаних джерел

- [1] Э. Р. Домке, *Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий*: учебник для студентов вузов, обучающихся по спец. "Организация и безопасность движения (автомоб. транспорт)", направление подготовки "Организация перевозок и упр. на транспорте". Санкт-Петербург, Россия: Академия, 2009.

- [2] В. Д. Балкин, *Экспертиза дорожно-транспортных происшествий*: учеб. пособие. Омск, Россия: СибАДИ, 2005.
- [3] В. А. Иларионов, *Экспертиза дорожно-транспортных происшествий*: учебник для вузов, Москва, Россия: Транспорт, 1989.
- [4] Н. М. Кристи, *Методические рекомендации по производству автотехнической экспертизы*: справ. пособие. Москва, Россия: ЦНИСЭ, 1971.
- [5] И. С. Степанов, Ю. Ю. Покровский, В. В. Ломакин, и Ю. Г. Москалева, *Влияние элементов системы водитель - автомобиль - дорога - среда и безопасность дорожного движения*: учеб. пособие для студентов, обучающихся по спец. "Автомобиле- и тракторостроение". Москва, Россия: МГТУ "МАМИ", 2014.
- [6] Ю. Г. Корухов, *Транспортно-трасологическая экспертиза по делам о дорожно-транспортных происшествиях*: метод. пособие для экспертов, следователей и судей. Москва, Россия: Библиотека эксперта, 2006.
- [7] С. А. Евтюков, и Я. В. Васильев, *Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий*. Санкт-Петербург, Россия: Изд-во ДНК, 2004.
- [8] Ю. Б. Суворов, *Судебная дорожно-транспортная экспертиза. Судебно-экспертная оценка действий водителей и других лиц, ответственных за обеспечение безопасности дорожного движения, на участках ДТП*: учеб. пособие. Москва, Россия: Экзамен, 2004.
- [9] В. А. Бекасов, Г. Я. Боград, Б. Л. Зотов, и Г. Г. Индиченко, *Автотехническая экспертиза*. Москва, Россия: Юрид. лит-ра, 1967.
- [10] Kenneth R. Agent, and Jerry G. Pigman, *A-A highway safety study*, Kentucky Transportation Center Research Report, 2000.
- [11] H. Ward Smith, "Physical evidence in the investigation of traffic accidents", *J. Crim. L. & Criminology*, 48, 1993.
- [12] Т. Г. Гасанов, и М. Р. Гусейнов, "К установлению характеристик динамики процесса столкновения транспортных средств и наезда на препятствие", *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*, № 21, с. 77-82, 2011.
- [13] М. В. Підгорний, "Інформатизація виробничих процесів транспортної інфраструктури", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, с. 14-20, 2014.
- [14] В. В. Столяров, *Экспертиза дорожно-транспортных происшествий на основе теории риска*: учеб. пособие. Саратов, Россия, 1996.
- [15] М. В. Немчинов, *Сцепные качества дорожных покрытий и безопасность движения автомобиля*. Москва, Россия: Транспорт, 1985.

References

- [1] E. R. Domke, *Investigation and expertise of road traffic accidents: a textbook for university students studying in the specialty "Organization and traffic safety (motor transport)"*, the direction of training "Organization of transportation and control on transport". St. Petersburg, Russia: Academy, 2009 [in Russian].
- [2] V. D. Balkin, *Expertise of road traffic accidents: a tutorial*. Omsk, Russia: SibADI, 2005 [in Russian].
- [3] V. A. Ilarionov, *Expertise of road traffic accidents: a textbook for universities*, Moscow, Russia: Transport, 1989 [in Russian].
- [4] N. M. Christie, *Guidelines for the production of auto-technical expertise: a reference guide*, Moscow, Russia: TsNISE, 1971 [in Russian].
- [5] I. S. Stepanov, Yu. Yu. Pokrovsky, V. V. Lomakin, and Yu. G. Moskaeva, *Influence of the elements of the system driver - car - road - environment and traffic safety: a textbook for students studying in the specialty "Automotive and Tractor Engineering"*. Moscow, Russia: MGTU "MAMI", 2014 [in Russian].
- [6] Yu. G. Korukhov, *Transport and trasological expertise on cases of road traffic accidents: a method. guide for experts, investigators and judges*, Moscow, Russia: Biblioteka eksperta, 2006 [in Russian].
- [7] S. A. Evtyukov, and Ya. V. Vasiliev, *Investigation and expertise of road traffic acci-*

- dents. St. Petersburg, Russia: Izd-vo DNK, 2004 [in Russian].
- [8] Yu. B. Suvorov, *Judicial road transport expertise. Forensic expert assessment of the actions of drivers and other persons responsible for ensuring road safety at road traffic accidents: a tutorial*, Moscow, Russia: Examen, 2004 [in Russian].
- [9] V. A. Bekasov, G. Ya. Bograd, B. L. Zotov, and G. G. Indichenko, *Automotive expertise*: Moscow, Russia: Yurid. lit-ra, 1967 [in Russian].
- [10] Kenneth R. Agent, and Jerry G. Pigman, *A-A highway safety study*, Kentucky Transportation Center Research Report, 2000.
- [11] H. Ward Smith, "Physical evidence in the investigation of traffic accidents", *J. Crim. L. & Criminology*, 48, 1993.
- [12] T. G. Gasanov, and M. R. Guseinov, "On the establishment of characteristics of the dynamics of the process of collision of vehicles and collision with an obstacle", *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*, no. 21, pp. 77-82, 2011 [in Russian].
- [13] M. V. Pidgorniy, "Informatization of production processes in transport infrastructure", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu*, no. 1, pp. 14-20, 2014 [in Ukrainian].
- [14] V. V. Stolyarov, *Expertise of road traffic accidents on the basis of risk theory: a textbook*. Saratov, Russia, 1996 [in Russian].
- [15] M. V. Nemchinov, *Coupling qualities of road surfaces and the safety of car traffic*. Moscow, Russia: Transport, 1985 [in Russian].

S. V. Romashko,

head of the automotive research sector,

V. B. Kharenko,

forensic expert of the automotive research sector,

Cherkasy Scientific Research Forensic Centre of the Ministry of Internal Affairs in Ukraine

Pasterivska st., 104, Cherkasy, 18009, Ukraine

V. V. Lytovchenko, *postgraduate,*

M. V. Pidhornyy, *Ph.D., associate professor,*

Dean of the faculty of computer technologies of mechanical engineering and design

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

MODELS OF MOTION OF MOTOR VEHICLES IN CROSS-COLLISIONS

The practice of road accident investigation shows that due to the specificity of this category of criminal cases, one of the main sources of evidence is the conclusion of auto-technical expertise, which today is based on the use of information technology and technical means. The causes of road accidents are the result of the action of two or more active components – violations of traffic safety rules, which create an integrative integral system.

The mechanism of a traffic accident is a complex of circumstances connected by objective regularities that determine the process of approaching of a vehicle with an obstacle before a collision, its interaction with an obstacle in a collision, a blow and the subsequent movement of vehicles and other objects isolated by impact to stop. The collision of vehicles is the most dangerous type of road accident in terms of the number of victims and the amount of material damage. When investigating road accidents related to cross-collisions, it becomes necessary to establish the mechanism of a road traffic accident, as well as to determine which of the cars that collided first drove to the intersection. This is possible if the models of the movement of vehicles are investigated. The purpose of the publication is to determine the features of the movement (movement model) of vehicles in cross-collisions. The main task of auto-technical expertise in collision investigation is the establishment of the mechanism of a road traffic accident. To restore the collision mechanism of vehicles, it is necessary to determine the

place of the accident, the relative position of the vehicles at the moment of impact, the location on the road, the speed of the vehicles before the collision. The method of expert research in establishing the collision mechanism depends on the type of collision, is determined by the nature of the impact: blocking, sliding, tangential. The models of the collision mechanism in cross-traffic accidents presented in the publication, the specified research issues of the expertise technology have significance and affect the conclusion during the auto-technical expertise, and the method for calculating the vehicle speed in a cross-collision has been improved. The indicated method makes it possible to further implement it by means of computer technology.

Keywords: car, collision, road accident, intersection, research, forensic expertise.

[0000-0002-6204-0708] **Т. О. Прокопенко, д.т.н., професор,**
 завідувач кафедри інформаційних технологій проектування
 e-mail: t.prokopenko@chdtu.edu.ua
 [0000-0001-5571-2281] **О. В. Лавданська, к.т.н.,**
 доцент кафедри інформаційних технологій проектування
 e-mail: yegorovaov@gmail.com
 Черкаський державний технологічний університет
 б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ОЦІНКА КОНФЛІКТНОСТІ КОМПОЗИЦІЇ РОЛЕЙ ПРОДУКТОВОГО МЕНЕДЖЕРА І ВЛАСНИКА ПРОДУКТУ У ПРОЕКТНИХ КОМАНДАХ

У статті порівнюються функціональні обов'язки продуктового менеджера і власника продукту. Наведено підходи до структуризації команд розробників програмного забезпечення. Розглянуто обов'язки та завдання менеджера продукту і власника продукту. З'ясовано, що менеджер продукту як член проектної команди відповідає за прийняття бізнес-рішень та розробку стратегії продукту, а власник продукту відповідає за створення цінності ІТ-продукту. Діяльність продуктового менеджера орієнтована на стратегічний розвиток ІТ-продукту, а власника продукту – на досягнення тактичних цілей під час створення і вдосконалення ІТ-продукту. Частково сфери відповідальності продуктового менеджера і власника продукту перетинаються. Делегування виконання одній людині ролі продуктового менеджера і власника продукту може призвести до втрати стратегічного бачення цілей ІТ-продукту або ж надмірного заглиблення у процес розробки програмного забезпечення.

Ключові слова: agile, Scrum, методологія, продукт, менеджер, власник, обов'язки, навички.

Вступ. Поява лаконічного і змістовного документа у вигляді Agile-маніфесту [1] спричинила справжню революцію у сфері розробки програмного забезпечення. Відтоді ІТ-компанії по всьому світу по-різному сприйняли, адаптували свою структуру і розробляють програмне забезпечення на основі таких гнучких методологій розробки, як Scrum, Kanban, Extreme Programming, Crystal, Dynamic System Development Method, Feature-Driven Development чи Lean Development. Дедалі частіше з'являються успішні приклади використання гнучких методологій для реалізації телекомунікаційних, рекламних, фінансових, промислових та інших проектів.

Розробка програмного продукту є творчим процесом, який потребує наявності всередині компанії нових ідей, спеціального фонду для їх реалізації і талановитих працівників. Результатом такої розробки має бути унікальний продукт, який би задовольняв потреби користувачів та бажання замовника, а також гідна винагорода для всіх учасників процесу розробки за свою діяльність.

Реалізація проектів інформатизації в кожній галузі відбувається із залученням широкого кола фахівців різних спеціальностей та з використанням диференційованих підходів для врахування специфічних особливостей галузі, проте основні аспекти процесу розробки програмного забезпечення залишаються незмінними.

Ключові принципи гнучких методологій, що стосуються команди проекту, декларують [2]:

- щоденну співпрацю розробників і представників бізнесу впродовж реалізації усього проекту;
- залучення для роботи над проектом вмотивованих професіоналів, для яких створено належні умови праці та яким надано необхідну підтримку;
- підтримку особистої комунікації як найбільш ефективного і практичного методу донесення інформації до команди та її поширення всередині команди;
- розподіл обов'язків та відповідальності у проекті шляхом використання рольової моделі.

В умовах зменшення часової відстані між виникненням ідеї програмного продукту та виведенням його на ринок здатність команд використовувати колективну мудрість усієї команди для оптимальної організації роботи стала вирішальною в усіх гнучких методологіях. Яким чином сучасні команди розробників програмного забезпечення структурують свою роботу, які ролі і обов'язки має кожний член команди і як з'ясувати, наскільки ефективно працює команда із продуктом?

Метою дослідження є аналіз та порівняння функціональних обов'язків менеджера продукту і власника продукту у Scrum-командах для вивчення необхідності запровадження цих ролей у проєкті, можливості їх виконання однією людиною та впливу поєднання ролей на ефективність виробництва якісного програмного продукту.

Задачами дослідження є:

- аналіз підходів до структуризації команд розробників програмного забезпечення;
- аналіз обов'язків та навичок менеджера продукту;
- аналіз обов'язків та навичок власника продукту.

Виклад основного матеріалу

1. Підходи до структуризації команд розробників програмного забезпечення. Як зазначають дослідники в [3, 4], в гнучких методиках розробки програмного забезпечення утворення команди базується на принципах самоорганізації. Щоб зрозуміти та реалізувати концепцію самоорганізації, командам необхідний деякий час, але наявність необхідного програмного забезпечення для управління проєктами, навчання, менторство та керівництво, безумовно, забезпечують здатність самоорганізованих команд швидко створити якісний продукт в динамічних умовах [5].

В одному з підходів до структуризації команди розробників програмного забезпечення, що описаний в роботі [6], гнучкі команди розробників програмного забезпечення поділяють на три типи: «команда пілотів», яка займається управлінням проєктом; «комп'ютерна команда», яка займається створенням нових програмних продуктів; «команда клубу веселих та кмітливих», яка займається розв'язанням складних проблем.

У другому підході [7, 8] команди розробників програмного забезпечення поділяють на універсальні, спеціалізовані та гібридні. Універсальна команда відповідає за забезпечення неперервності роботи над проєктом. Вона складається з фахівців, які володіють різнопрофільними навичками та досвідом. До складу спеціалізованих команд запрошують фахівців, які володіють спеціальними знаннями та навичками у певній предметній області. Водночас кожен із них відповідає за реалізацію відповідної складової частини проєкту. Гібридні команди формуються на основі універсальних та вузькоспеціалізованих фахівців, які вже працюють над поточним проєктом, але у разі потреби можуть скоротити перелік призначених для них задач.

Автори іншого підходу у праці [9] виділяють команди розробників програмного забезпечення таких типів: «команда для виконання потоку робіт», яка призначена для створення та постачання цінностей замовнику чи користувачу швидко, безпечно і незалежно від інших команд, що працюють над проєктом; «команда для розробки складних підсистем», що відповідає за розробку та підтримку тієї частини програмної системи, яка настільки сильно залежить від знань спеціалістів, що більшість членів команди повинні бути фахівцями в цій галузі знань, щоб зрозуміти та внести зміни в підсистему; «команда-платформа», яка призначена для надання основних внутрішніх послуг командам, що вирівнюють потоки, або для надання функціональних можливостей вищого рівня з метою зменшення когнітивного навантаження.

Незалежно від обраної ІТ-компанією структури команди розробників, кожному представникові команди розробників делегується виконання певної ролі у проєкті. В сучасних ІТ-проєктах використовують щонайменше шість ролей із перелічених [10, 11]: менеджер продукту (product manager), менеджер проєкту (project manager), UI/UX-дизайнер (UI/UX designer), команда розробників (development team), команда із забезпечення якості (QA team), системний архітектор (software architect), бізнес-аналітик (business analyst), делівері-менеджер (delivery manager).

Як відомо, Scrum-команда розробників програмного забезпечення складається із Scrum-майстра (Scrum master), власника про-

дукту (product owner) і команди розробників (developers).

Чи може одна людина у проекті поєднувати виконання проектної ролі і ролі у Scrum-команді? Скільки проектних і Scrum-ролей може виконувати одна людина? Які проектні і Scrum-ролі може виконувати одна людина? Відповіді на ці запитання є інтуїтивно зрозумілими щодо команди розробників. Найбільше ж протиріч виникає щодо проектної ролі менеджера продукту (product manager) і Scrum-ролі власника продукту (product owner). Згідно з цілями дослідження з'ясуємо, якими мають бути менеджер продукту і власник продукту, розглянемо функціональні обов'язки, які вони виконують, та визначимо необхідні для цього знання.

2. Обов'язки та навички менеджера продукту. Продуктовий менеджер – це фахівець у сфері інформаційних технологій, бізнесу та досвіду взаємодії користувача із продуктом, діяльність якого спрямована на концептуальну розробку, забезпечення та утримання успішності IT-продукту на ринку.

Обов'язки менеджера продукту суттєво різняться на різних етапах розвитку продукту. Фредерік Е. Вебстер (Frederick E. Webster, Jr.) виділяє сім етапів розробки нового продукту [12]:

- розробка стратегії нового продукту;
- генерація ідеї нового продукту;
- формування первинної множини ідей;
- бізнес-аналіз;
- безпосередня розробка продукту;
- тестування продукту на ринку;
- монетизація продукту.

Класифікацію продуктових менеджерів за новизною версій програмних продуктів, над якими вони працюють, наведено в [13], де виділяють:

- продуктового менеджера, який працює над поточною версією продукту і відповідає за її зростання;
- продуктового менеджера, який займається плануванням і розробкою наступного випуску продукту;
- продуктового менеджера, який працює над майбутніми продуктами і ринками, визначає стратегію продукту.

Управлінська команда відомого онлайн-майданчика для розміщення та пошуку короткострокової оренди приватного житла по

всьому світу «Airbnb» залучає для роботи у компанії продуктових менеджерів із принципово різним набором навичок та вмінь і, залежно від етапу розвитку продукту, умовно поділяє їх на три категорії [14]:

- «відкривачі» (pioneers) залучаються до роботи над продуктом на етапі розробки його ідеї;
- «поселенці» (settlers) залучаються до роботи над продуктом на етапі його зростання;
- «містобудівники» (town planners) залучаються до роботи над вже розвиненими продуктами.

В [15] продуктових менеджерів класифікують за ознакою причетності до певного етапу розвитку стартапу:

- продуктовий менеджер, який працює над стартапом;
- продуктовий менеджер, який працює над діючим продуктом;
- продуктовий менеджер, який працює в стартапі, що «зміг втриматися на плаву»;
- продуктовий менеджер, який працює в «кишеньковому» стартапі;
- продуктовий менеджер, який працює над продуктом, що успішно розвивається.

Продуктового менеджера часто порівнюють із архітектором, який проектує будинки, чи дизайнером одягу або ж сценаристом художнього фільму, які вміють сформулювати концепцію продукту та пропонують її реалізувати команді розробників. Продуктовий менеджер шукає на ринку проблеми, які може вирішити компанія, досліджує конкурентне середовище та цільову аудиторію, а потім працює з командами розробників і маркетингових, для того щоб вивести сформовані рішення на ринок. Продуктовий менеджер концентрує зусилля на розвитку продукту, який із мінімальними інвестиціями принесе найбільший прибуток. Продуктовий менеджер відповідає за бачення і напрям розвитку продукту у довгостроковій стратегії компанії.

До обов'язків менеджера продукту належать [16–19]:

- визначення ринкових потреб та очікувань клієнтів, взаємодія із замовниками та ринками;
- аналіз конкурентного середовища, розуміння сильних і слабких сторін конкурентів, тенденцій ринку;

- розробка та управління ідеями, що забезпечать цінність для споживачів;
 - оцінювання привабливості бізнес-можливостей;
 - управління баченням, цілями та дорожньою мапою продукту;
 - управління релізами шляхом визначення пріоритетності важливих для користувачів функцій;
 - формування, збір і аналіз вимог до продукту через спілкування із замовником та його командою;
 - визначення та аналіз ключових метрик продукту;
 - покращення досвіду використання продукту;
 - краудсорсинг, тестування ідеї або прототипу майбутнього продукту на потенційних споживачах;
 - надання підтримки команді у постачанні рішень.
- Загалом продуктове управління повинен:
- бути корисним для споживачів;
 - приносити максимальну цінність компанії та відповідати її баченню;
 - швидко генерувати і впроваджувати ідеї, які принесуть компанії гроші;
 - правильно визначати ціну товару;
 - приймати ризики і керувати ними;
 - професійно комунікувати й аналізувати поведінку людей.
- Компетентності продуктового менеджера наведено на рисунку 1.

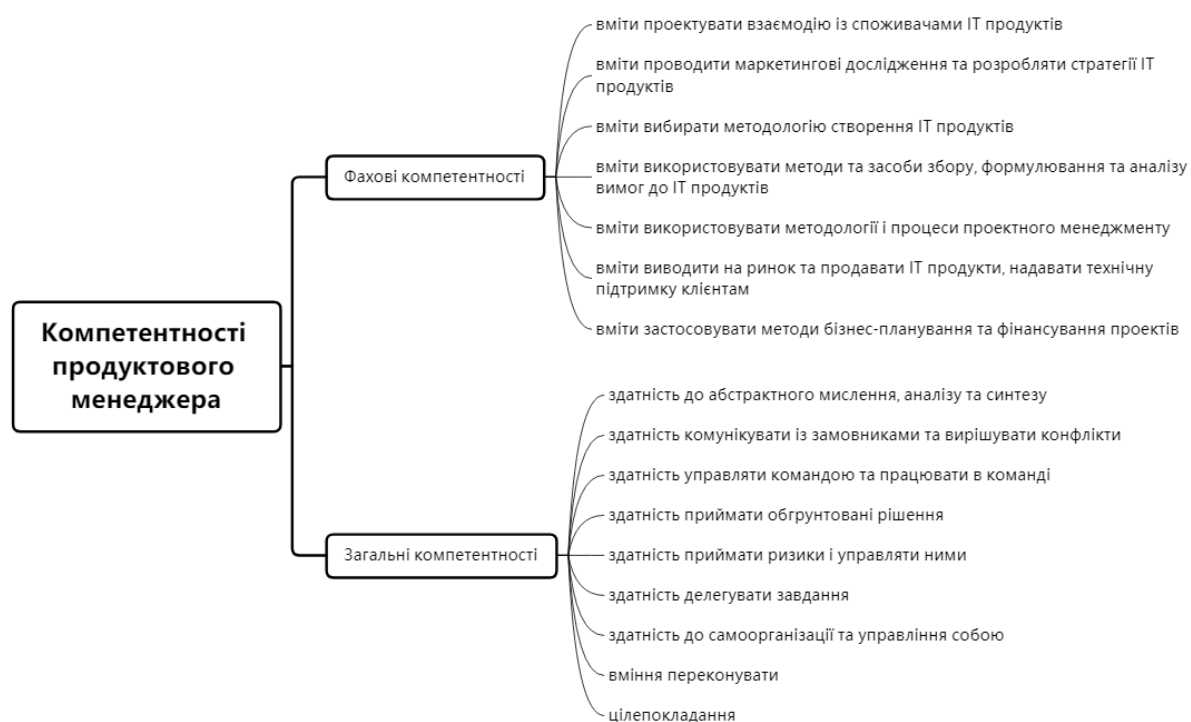


Рисунок 1 – Компетентності продуктового менеджера

Джерело: власне опрацювання на підставі [18], [20], [21]

Отже, менеджер продукту – це член проектної команди, який відповідає за прийняття бізнес-рішень та розробку стратегії продукту, що принесе дохід завдяки вирішенню проблеми користувачів.

3. Обов'язки та навички власника продукту. Власник продукту – це роль у Scrum-команді, виконавцю якої делегується відповідальність за управління проектом або

набором проектів для створення і вдосконалення IT-продукту.

Діяльність власника продукту спрямована на отримання працездатного IT-продукту, який відповідає очікуванням користувачів, а також створює цінність для зацікавлених сторін, що мають до нього доступ. Власник продукту керує backlog, визначає пріоритети задач у backlog, формує користувацькі історії,

взаємодіє з продуктовим менеджером, командою проекту та користувачами продукту, а іноді навіть контролює бюджет на розробку продукту.

До обов'язків власника продукту належать [18, 19, 22, 23]:

- взаємодія з командою розробників і технологіями;
- участь у формуванні командних рішень;
- створення списку задач, які необхідно виконати;
- наповнення та реалізація backlog;
- планування ітерацій і створення користувацьких історій;
- встановлення пріоритетів для користувацьких історій;
- визначення критеріїв приймання реалізації користувацьких історій;
- визначення шляхів підвищення цінності продукту;

- участь у процесі прийому нових учасників до проектної команди.

Власник продукту повинен:

- розуміти гнучкі методології розробки та фреймворки;
- бути корисним для команди розробників;
- контролювати ключові проблеми та створення цінності IT-продукту;
- виконувати декомпозицію проекту на окремі задачі та встановлювати їх пріоритетність;
- прогнозувати тренди майбутнього на основі доступних даних;
- працювати над оптимізацією IT-продукту;
- складати технічну документацію;
- володіти організаційними, аналітичними та комунікативними навичками.

Компетентності власника продукту наведено на рисунку 2.



Рисунок 2 – Компетентності власника продукту

Джерело: власне опрацювання на підставі [23], [24], [25]

Отже, власник продукту – це роль у Scrum-команді, виконавець якої створює цінність IT-продукту, розробляє дорожню карту продукту і список задач у проекті, а також представляє продукт перед розробниками та іншими стейкхолдерами.

Результати досліджень функціональних обов'язків та компетентностей продуктового менеджера і власника продукту свідчать

про наявність принципових відмінностей між цими ролями. Продуктовий менеджер не прив'язаний до жодної методології чи фреймворку, а власник продукту належить до Scrum-методології.

Продуктовий менеджер відповідає за формування бачення і визначення напрямів розвитку IT-продукту. Він досліджує конкурентне середовище та цільову аудиторію,

а потім працює з командами розробників і маркетологів для того, щоб вивести сформовані рішення на ринок.

Власник продукту відповідає за створення цінності IT-продукту. Він керує backlog та взаємодіє з продуктовим менеджером, командою проекту і користувачами продукту завдяки наявності здатності розробляти, супроводжувати та забезпечувати якість програмного забезпечення.

Обговорення. На теоретичному рівні виконання однією людиною ролей продуктового менеджера і власника продукту видається реально можливим. Така ситуація є прийнятною для стартапів, які ще не встигли накопичити досвід. На практиці ж об'єднання ролей спричиняє необхідність балансування стратегічних і тактичних цілей, а також виведення деяких функціональних обов'язків за межі сфери відповідальності. Це призводить до втрати стратегічного бачення цілей IT-продукту або ж надмірного заглиблення у процес розробки програмного забезпечення, що негативно позначається на цінності IT-продукту та його якості. Безперечно, частково сфери відповідальності продуктового менеджера і власника продукту перетинаються, що зумовлює необхідність співпраці та колективного прийняття рішень.

Висновки. Виконаний порівняльний аналіз функціональних обов'язків менеджера продукту і власника продукту у проектних командах дав можливість встановити, що продуктовий менеджер загалом відповідає за розробку концепції IT-продукту, позиціонування його на ринку та формування планів і напрямів розвитку, а власник продукту відповідає за реалізацію плану виробництва IT-продукту з урахуванням наявних часових, вартісних та якісних обмежень. Делегування виконання одній людині ролі продуктового менеджера і власника продукту можливе протягом кількох місяців, але в перспективі це призведе до погіршення якості IT-продукту.

У контексті проведеного аналізу подальшого дослідження потребують питання вимірювання впливу компетентності менеджера продукту і власника продукту на якість IT-продукту з урахуванням спеціалізації IT-компанії та питання розвитку професійної майстерності обох ролей.

Список використаних джерел

- [1] M. Fowler, and J. Highsmith, "The agile manifesto", *Software Development Magazine*, vol. 9, no. 8, pp. 28-35, 2001.
- [2] "Основні принципи Agile-маніфесту". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://agilemanifesto.org/iso/uk/principles.html>.
- [3] R. Hoda, and L. K. Murugesan, "Multi-level agile project management challenges: A self-organizing team perspective", *Journal of Systems and Software*, vol. 117, pp. 245-257, 2016.
- [4] N. B. Moe, T. Dingsøyr, and T. Dybå, "Understanding self-organizing teams in agile software development", in *Proc. 19th Australian Conf. on Software Engineering 2008 (ASWEC 2008)*, 2008, pp. 76-85.
- [5] "Why do you need self-organizing teams in an agile environment?" [Online]. Available: <https://kissflow.com/project/agile/importance-of-self-organizing-teams/>.
- [6] N. B. Moe, T. Dingsøyr, and T. Dybå, "Overcoming barriers to self-management in software teams", *IEEE software*, vol. 26, no. 6, 2009.
- [7] "Как выглядит структура команды Agile разработки?" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://itanddigital.ru/agileteam?>
- [8] K. Mangu-Ward, "Three types of agile teams". [Online]. Available: <https://www.aug.co/blog/three-types-of-agile-teams>
- [9] M. Skelton, and P. Manuel, *Team Topologies*. IT Revolution Press, 2019.
- [10] "6 ключевых ролей в команде разработки программного обеспечения". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://smartum.pro/ru/blog-ru/6-roley-v-komande-razrabotki-programmnogo-obespecheniya/>.
- [11] M. Andrew, "Software development roles and responsibilities in outsourcing". [Online]. Available: <https://qarea.com/blog/software-development-roles-and-responsibilities-in-outsourcing>.
- [12] F. E. Webster Jr., *Industrial Marketing Strategy*, 3rd ed. Wiley, 2008.

- [13] Курс Product Manager. Управление продуктом. Продакт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://analytics.infozone.pro/free-training-course-product-manager/>.
- [14] Airbnb Product Manager (PM) Interview Guide. [Online]. Available: <https://www.tryexponent.com/guides/airbnb/pm-interview/tips-on-case-study-presentation>.
- [15] A. Karol, и М. Ротарь, "Роль Product Manager на разных этапах развития проекта". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dou.ua/lenta/articles/product-manager-roles/>.
- [16] "What is the role of a product manager?" [Online]. Available: <https://www.aha.io/roadmapping/guide/product-management/what-is-the-role-of-a-product-manager>.
- [17] V. Mirnenko, "Hi батого, ні пряника: чим і як керує product manager". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dou.ua/lenta/articles/product-manager/>.
- [18] М. Мельник, "Product owner vs product manager или product owner/product manager". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://skillsup.ua/blog/2021/01/it-role-product-owner/>.
- [19] "Product manager vs. product owner". [Online]. Available: <https://www.productplan.com/learn/product-manager-vs-product-owner/>.
- [20] "Top skills for a product manager: A comprehensive list". [Online]. Available: <https://www.indeed.com/career-advice/resumes-cover-letters/skills-for-product-manager>.
- [21] A. Doyle, "Important skills for product manager jobs". [Online]. Available: <https://www.thebalancecareers.com/list-of-product-manager-skills-2062460>.
- [22] "7 key product owner responsibilities". [Online]. Available: <https://www.lucidchart.com/blog/product-owner-roles-and-responsibilities>.
- [23] "Product owner role в Скраме: обязанности, масштаб". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://brainrain.com.ua/product-owner/>.
- [24] J. Fechter, "Essential product owner skills in 2021". [Online]. Available: <https://productmanagerhq.com/product-owner-skills/>.
- [25] D. Pereira, "What are the skills that a product owner must have". [Online]. Available: <https://uxdesign.cc/what-are-the-skills-that-a-product-owner-must-have-5bf033a153dc>.

References

- [1] M. Fowler, and J. Highsmith, "The agile manifesto", *Software Development Magazine*, vol. 9, no. 8, pp. 28-35, 2001.
- [2] "Basic principles of the Agile Manifesto". [Online]. Available: <https://agilemanifesto.org/iso/uk/principles.html> [in Ukrainian].
- [3] R. Hoda, and L. K. Murugesan, "Multi-level agile project management challenges: A self-organizing team perspective", *Journal of Systems and Software*, vol. 117, pp. 245-257, 2016.
- [4] N. B. Moe, T. Dingsøyr, and T. Dybå, "Understanding self-organizing teams in agile software development", in *Proc. 19th Australian Conf. on Software Engineering 2008 (ASWEC 2008)*, 2008, pp. 76-85.
- [5] "Why do you need self-organizing teams in an agile environment?" [Online]. Available: <https://kissflow.com/project/agile/importance-of-self-organizing-teams/>.
- [6] N. B. Moe, T. Dingsøyr, and T. Dybå, "Overcoming barriers to self-management in software teams", *IEEE software*, vol. 26, no. 6, 2009.
- [7] "How does the structure of an Agile development team look like?" [Online]. Available: <https://itanddigital.ru/agileteam/> [in Russian].
- [8] K. Mangu-Ward, "Three types of agile teams". [Online]. Available: <https://www.aug.co/blog/three-types-of-agile-teams>.
- [9] M. Skelton, and P. Manuel, *Team Topologies*. IT Revolution Press, 2019.
- [10] "6 key roles in a software development team". [Online]. Available: <https://smartum.pro/ru/blog-ru/6-roley-v-komande-razrabotki-programmnogo-obespecheniya/> [in Russian].

- [11] M. Andrew, "Software development roles and responsibilities in outsourcing". [Online]. Available: <https://qarea.com/blog/software-development-roles-and-responsibilities-in-outsourcing>.
- [12] F. E. Webster Jr., *Industrial Marketing Strategy*, 3rd ed. Wiley, 2008.
- [13] Course Product Manager. Product management. Product. [Online]. Available: <https://analytics.infozone.pro/free-training-course-product-manager/> [in Russian].
- [14] Airbnb Product Manager (PM) Interview Guide. [Online]. Available: <https://www.tryexponent.com/guides/airbnb/pm-interview/tips-on-case-study-presentation>.
- [15] A. Karol, and M. Rotar, "The role of the product manager at different stages of project development". [Online]. Available: <https://dou.ua/lenta/articles/product-manager-roles/> [in Russian].
- [16] "What is the role of a product manager?" [Online]. Available: <https://www.aha.io/roadmapping/guide/product-management/what-is-the-role-of-a-product-manager>.
- [17] V. Mirnenko, "No whip, no gingerbread: what and how the product manager manages". [Online]. Available: <https://dou.ua/lenta/articles/product-manager/> [in Ukrainian].
- [18] M. Melnyk, "Product owner vs product manager or product owner/product manager". [Online]. Available: <https://skillsup.ua/blog/2021/01/it-role-product-owner/> [in Russian].
- [19] "Product manager vs. product owner". [Online]. Available: <https://www.productplan.com/learn/product-manager-vs-product-owner/>.
- [20] "Top skills for a product manager: A comprehensive list". [Online]. Available: <https://www.indeed.com/career-advice/resumes-cover-letters/skills-for-product-manager>.
- [21] A. Doyle, "Important skills for product manager jobs". [Online]. Available: <https://www.thebalancecareers.com/list-of-product-manager-skills-2062460>.
- [22] "7 key product owner responsibilities". [Online]. Available: <https://www.lucidchart.com/blog/product-owner-roles-and-responsibilities>.
- [23] "Product owner role in Scrum: responsibilities, scope". [Online]. Available: <https://brainrain.com.ua/product-owner/>.
- [24] J. Fechter, "Essential product owner skills in 2021". [Online]. Available: <https://productmanagerhq.com/product-owner-skills/>.
- [25] D. Pereira, "What are the skills that a product owner must have". [Online]. Available: <https://uxdesign.cc/what-are-the-skills-that-a-product-owner-must-have-5bf033a153dc>.

T. O. Prokopenko, *D.Tech.Sc., professor,*
head of the department of information technology design,
e-mail: t.prokopenko@chdtu.edu.ua

O. V. Lavdanska, *Ph.D., associate professor*
of the department of information technology design
e-mail: yegorovaov@gmail.com

Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

ASSESSMENT OF THE CONFLICT COMPOSITION OF THE ROLES OF PRODUCT MANAGER AND PRODUCT OWNER IN PROJECT TEAMS

The article compares the functional responsibilities of a product manager and a product owner. Approaches to structuring software development teams are considered. The responsibilities and tasks of the product manager and product owner are discussed. It is established that the responsibilities of the product manager differ significantly at different stages of product development. The classification of product managers on the basis of the degree of novelty of the version of the software product they are working on, the degree of involvement in the stages of product development, the degree of in-

volvement in a particular stage of development of the startup is considered. It is found that the product manager as a member of the project team is responsible for making business decisions and developing product strategy, and the product owner is responsible for creating the value of the IT product. The product manager explores the competitive environment and target audience, and then works with teams of developers and marketers to bring existing solutions to market. The product manager concentrates his efforts on developing the product that will bring the greatest profit with minimal investment. The product manager is responsible for the vision and direction of product development in the long-term strategy of the company. The product owner manages the backlog, develops the product roadmap and to-do list in the project, and presents the product to developers and other stakeholders. The product owner interacts with the product manager, project team, and product users through the ability to develop, maintain, and ensure software quality. The product owner is responsible for creating product value of the company in the short-term strategy. In part, the responsibilities of the product manager and the product owner intersect. Delegating the role of product manager and product owner to one person can lead to a loss of strategic vision of the IT product's goals or excessive immersion in the software development process.

Keywords: *agile, Scrum, methodology, product, manager, owner, responsibilities, skills.*

УДК 004.383 (043)

[0000-0002-4066-8182] Д. А. Гардер

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

В роботі запропоновано підвищення ефективності інформаційної технології параметричної оптимізації режимів автоматизованого лазерного зварювання тонкостінних конструкцій зі сталі в умовах невизначеності шляхом розробки інформаційної спеціалізованої бази даних за результатами експериментальних параметричних досліджень, створення інформаційної технології аналітичного опису функціональних залежностей між шириною зварного шва, швидкістю переміщення лазерного випромінювання щодо оброблюваної заготовки і потужністю лазерного випромінювання. Запропоновано принцип прийняття рішення параметричної оптимізації в умовах невизначеності на базі розробленого графоаналітичного методу. Метод використовує графічне зображення сплайн-функцій, побудованих в єдиному квадранті із загальною абсцисою, значення якої відповідає величинам зварного шва. Координати точки перетину функціональних залежностей визначають відповідні оптимальні параметри режиму автоматизованого лазерного зварювання тонкостінних конструкцій зі сталі. Візуалізація принципу параметричної оптимізації в умовах невизначеності прискорює процес технологічної підготовки виробництва, що сприяє підвищенню продуктивності підприємства.

Ключові слова: лазерне зварювання тонкостінних конструкцій, умови невизначеності, графоаналітичний метод, параметрична оптимізація.

Вступ. Головною рисою сучасного етапу науково-технічного прогресу є застосування інформаційних технологій, які ґрунтуються на останніх наукових досягненнях.

Розвиток таких пріоритетних галузей промисловості, як: оборонна, ракетно-космічна, суднобудування, приладобудування, медична, авіаційна та інші, обумовлює постійно зростаючу потребу в автоматизованих лазерних технологіях зварювання та новому обладнанні. Їх застосування забезпечує ресурсо-, енергозбереження, екологічність при нероз'ємному з'єднанні як великогабаритних, так і мініатюрних тонкостінних конструкцій. Проблема полягає в тому, що на якість нероз'ємного з'єднання тонкостінних конструкцій при виконанні операції автоматизованого лазерного зварювання (АЛЗ) в режимі реального часу впливають багато факторів: властивість матеріалів з'єднаних конструкцій, стан навколишнього середовища, технологічного обладнання, зварювального, вимірювального інструментів та ін. Отримання якісного з'єднання вимагає попереднього дослідження перелічених факторів, на це витрачається багато часу, що економічно не вигідно. Особливо це відчутно при відсутності серій-

ного випуску продукції. У такому разі частіше доводиться приймати рішення по визначенню оптимальних параметрів режимів зварювання в умовах невизначеності, що призводить або до зниження якості, або до збільшення вартості продукції через використання багатьох енергочасових, людських та матеріальних витрат на попереднє дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом з'явилося багато публікацій, в яких наведено приклади створення лазерних комплексів та лазерного інструменту [1, 22, 23]. В роботах [2-3] представлено компактні конструкції лазерних мобільних установок для зварювання листів з конструкційної та нержавіючої сталей і титану. Лазерним пучком управляє мікроконтролер. При зміні швидкості переміщення виробляється коректування потужності лазерного пучка, що сприяє одержанню зварного з'єднання необхідної якості. Ці конструкції характеризуються простотою керування процесом лазерного зварювання й економічністю, але робочий інструмент переміщується вручну.

Переносні апарати LHS-1 [4], LHS-2 [5], призначені для лазерного зварювання коротких стикових з'єднань і таврових з'єднань,

дають операторові можливість робити захоплення й подальше зварювання металоконструкцій в машино- і суднобудуванні. Параметри режиму зварювання задаються спеціальною програмою. У зварювальному учбово-дослідницькому центрі (Галле, Німеччина) розроблено два варіанти оригінального переносного устаткування для механізованого лазерного зварювання [6]. Зварювання проводиться в захисному газі, але позиціонування апаратів проводиться вручну. Такі компактні конструкції лазерних установок відзначаються простотою керування процесом і застосовуються, в першу чергу, на малих і середніх підприємствах.

В роботах [7-9] велика увага приділяється одному з напрямів розвитку лазерного зварювання, а саме – автоматизованому лазерному зварюванню (АЛЗ). Заслужують на увагу дослідження, спрямовані на визначення методів зварювання [10], [16], що забезпечують легкість управління конфігурацією лазерного випромінювання, за допомогою якої формуються міцна і високоякісна мікроструктура зварного шва та біляшовне оточення для різних матеріалів. Проте принцип прийняття рішення в умовах невизначеності при оптимізації режимів АЛЗ залишається трудомістким, і тому проблематика параметричної оптимізації є першочерговою науковою проблемною задачею.

Отже, наявна інформаційна технологія щодо розробки принципу підтримки прийняття рішення в умовах невизначеності для параметричної оптимізації режимів автоматизованого лазерного зварювання тонкостінних конструкцій вирішена не повною мірою, що підтверджує актуальність теми.

Метою роботи є підвищення ефективності інформаційної технології параметричної оптимізації режимів автоматизованого лазерного зварювання в умовах невизначеності шляхом розробки інформаційної спеціалізованої бази даних, за результатами експериментальних досліджень та графоаналітичного методу визначення найкращих значень потужності лазерного випромінювання та швидкості його переміщення і значення ширини зварного шва.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Створити інформаційну спеціалізовану базу даних відношень ширини зварного шва, швидкості та потужності режимів

зварювання тонкостінних конструкцій за результатами експерименту.

2. Встановити функціональні залежності між шириною зварного шва, швидкістю і потужністю режимів зварювання на основі апроксимації сплайн-функцій.

3. Розробити графоаналітичний метод визначення найкращих параметрів режимів зварювання тонкостінних конструкцій.

Основний матеріал. Дослідження впливу швидкості зварювання лазерним випромінюванням і потужності лазерного випромінювання на ширину зварного шва проводилися за методикою, яка містить опис і технології в роботах [9, 11, 12, 14, 17-21].

Устаткування – трикоординатний лазерний комплекс «АРМА-100М [13]»; інструмент – ітербієвий волоконний одномодовий лазер типу ЛС-01-Б потужністю випромінювання 100 Вт, діаметром пучка лазерного випромінювання 10 мкм; при зварюванні зона плавлення захищалася інертними газами: зверху гелієм, а знизу аргоном; вимірювальний інструмент – мікроскоп ММІ-2.

Об'єктом дослідження є зразки стрічок сталей:

№ 1 – сталь 12Х18Н10Т, товщина $\delta = 0,15$ мм;

№ 2 – сталь 1.4541, товщина $\delta = 0,15$ мм;

№ 3 – сталь 1.4541, товщина $\delta = 0,2$ мм.

За результатами дослідження впливу швидкості (V) і потужності (P) лазерного випромінювання на ширину зварного шва (b) створено інформаційну базу даних відношень ширини зварного шва, швидкості та потужності режиму зварювання тонкостінних конструкцій.

Приклади реляційних зображень даних показано на трьох зразках і наведено у таблиці 1 $b(V)$ при $P_i = \text{const}$; у таблиці 2 $b(P)$ при $V_i = \text{const}$ та різних типах сталі. Першими атрибутами у таблицях 1 і 2 є номер зразків №, тип сталі, товщина стрічки δ , величина потужності випромінювання P (у таблиці 1) і величина швидкості зварювання (у таблиці 2), їх відповідні домени мають кортежі швидкості зварювання (або потужності випромінювання) і відповідні значення ширини шва.

Аналіз результатів дослідження (таблиця 1) показав, як впливає значення швидкості лазерного зварювання при постійному значенні потужності лазерного випромінювання на ширину шва зварного з'єднання, тобто b зменшується при збільшенні V .

Таблиця 1 – Реляційна модель експериментальних даних (схема відношень швидкості лазерного зварювання при постійному значенні потужності лазерного випромінювання та ширини шва зварного з'єднання)

Зразок № 1, сталь 12X18H10, $\delta=0,15$ мм при $P_n = 65$ Вт	швидкість зварювання, $V \cdot 10^{-2}$ м/с	0,83	1,0	1,08	1,33	1,5	1,67	1,83	2	2,16	2,33	2,5
	ширина шва b , мм	1,37	1,21	1,09	0,92	0,77	0,7	0,64	0,57	0,55	0,49	0,46
Зразок № 2, сталь 1.4541, $\delta=0,15$ мм при $P_n = 55$ Вт	швидкість зварювання, $V \cdot 10^{-2}$ м/с	0,8	1,1	1,16	1,33	1,51	1,66	1,81	2	-	-	-
	ширина шва b , мм	0,88	0,73	0,69	0,64	0,59	0,52	0,5	0,45	-	-	-
Зразок № 3, сталь 1.4541, $\delta=0,2$ мм при $P_n = 60$ Вт	швидкість зварювання, $V \cdot 10^{-2}$ м/с	0,8	1,1	1,16	1,33	1,51	1,66	1,81	2	-	-	-
	ширина шва b , мм	0,75	0,68	0,65	0,625	0,61	0,58	0,54	0,49	-	-	-

Таблиця 2 – Реляційна модель експериментальних даних (схема відношень потужності лазерного випромінювання при постійному значенні швидкості лазерного зварювання та ширини шва зварного з'єднання)

Зразок № 1, сталь 12X18H10T, $\delta=0,15$ мм при швидкості зварювання $V=1,5 \cdot 10^{-2}$ м/с	Потужність лазерного випромінювання P , Вт	30	40	50	60	70	-
	Ширина шва b , мм	0,1	0,48	0,82	1,12	1,3	-
Зразок № 2, сталь 1.4541, $\delta=0,15$ мм при швидкості зварювання $V=0,8 \cdot 10^{-2}$ м/с	Потужність лазерного випромінювання P , Вт	50	60	70	80	90	-
	Ширина шва b , мм	0,55	0,74	0,75	0,76	0,77	-
Зразок № 3, сталь 1.4541, $\delta=0,2$ мм при швидкості зварювання $V=0,8 \cdot 10^{-2}$ м/с	Потужність лазерного випромінювання P , Вт	50	60	70	80	90	100
	Ширина шва b , мм	0,45	0,57	0,575	0,58	0,585	0,6

Аналіз результатів дослідження (таблиця 2) показав, як впливає значення потужності лазерного випромінювання при постійному значенні швидкості лазерного зварювання на ширину шва зварного з'єднання, а саме: b збільшується при збільшенні P .

Аналіз розглянутих вище схем відношень підтвердив необхідність параметричної оптимізації через суперечність впливу на ширину зварного шва значень параметрів V і P .

Для розв'язання цієї проблемної задачі пропонується графоаналітичний метод, який ґрунтується на використанні функціональних залежностей φ_1 , φ_2 між шириною зварного

шва, швидкістю і потужністю режиму зварювання:

$$b_1 = \varphi_1(V_i, P_j); \quad (1)$$

$$b_2 = \varphi_2(P_i, V_j), \quad (2)$$

де індекс « i » показує належність до поточного значення відповідного параметра або V_i , або P_i ; індекс « j » належить параметру значення, що дорівнює відповідній незмінній величині:

або $P_j \rightarrow \text{const}$, або $V_j \rightarrow \text{const}$.

Відомо, що математичні моделі, які побудовані за результатами експериментальних

досліджень, не призначені для фізичної інтерпретації, оскільки їх структура не пов'язана з якими-небудь невизначеними фізичними закономірностями [15]. Великою перевагою експериментальних методів є простота.

Математична модель апроксимуючих сплайн-функцій ширини зварного шва для зразка № 1, що проведена за таких умов:

– для моделі (1) діапазон зміни швидкості V становить

від $0,75 \cdot 10^{-2}$ м/с до $2 \cdot 10^{-2}$ м/с

при постійному значенні $P_1 = 65$ Вт;

– для моделі (2) діапазон зміни потужності P становить

від 49 Вт до 99 Вт

при постійному значенні $V_1 = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м/с, що мають вигляд відповідно:

$$b_1(V) = -0,1138 V^3 + 0,8768 V^2 - 2,4432 V + 2,8669 \quad (3)$$

$$b_1(P) = -0,000007 P^3 + 0,0007 P^2 + 0,0141 P - 0,7589 \quad (4)$$

На основі математичних моделей (3), (4) апроксимуючої сплайн-функції для залежностей $b_1(V)$ і $b_1(P)$ побудовано знакові моделі для зразка № 1, які зображено на рисунках 1 і 2 відповідно.

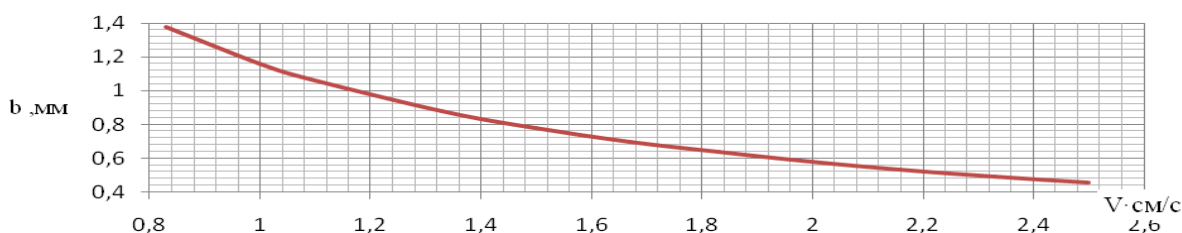


Рисунок 1 – Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від швидкості V переміщення лазерного випромінювання відносно заготовки, яка обробляється, для зразка № 1

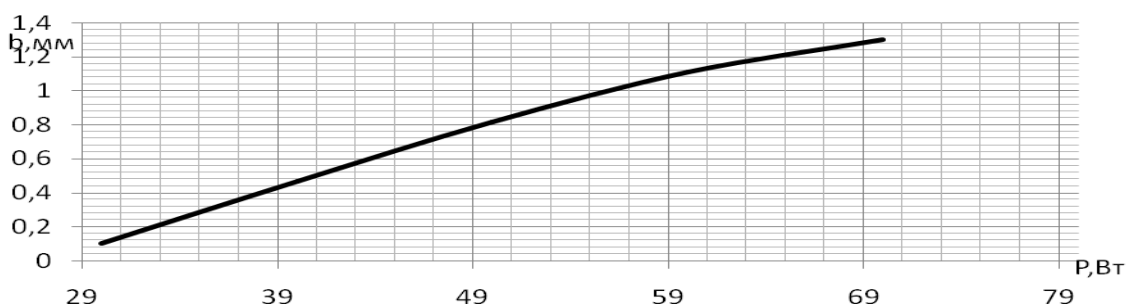


Рисунок 2 – Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від потужності P лазерного випромінювання для зразка № 1

Математична модель апроксимуючих сплайн-функцій ширини зварного шва для зразка № 2 проведена за таких умов:

– для моделі (1) діапазон зміни швидкості V становить

від $0,75 \cdot 10^{-2}$ м/с до $2 \cdot 10^{-2}$ м/с

при постійному значенні $P_2 = 55$ Вт;

– для моделі (2) діапазон зміни потужності P становить

від 49 Вт до 99 Вт

при постійному значенні $V_2 = 0,8 \cdot 10^{-2}$ м/с,

що мають вигляд відповідно:

$$b_2(V) = -0,0805 V^3 + 0,4831 V^2 - 1,2087 V + 1,5782 \quad (5)$$

$$b_2(P) = -0,000015 P^3 - 0,0034 P^2 + 0,256 P - 5,6046 \quad (6)$$

На основі математичних моделей апроксимуючої сплайн-функції для залежностей $b_2(V)$ і $b_2(P)$ побудовано знакові моделі для зразка № 2, які зображено на рисунках 3 і 4 відповідно.

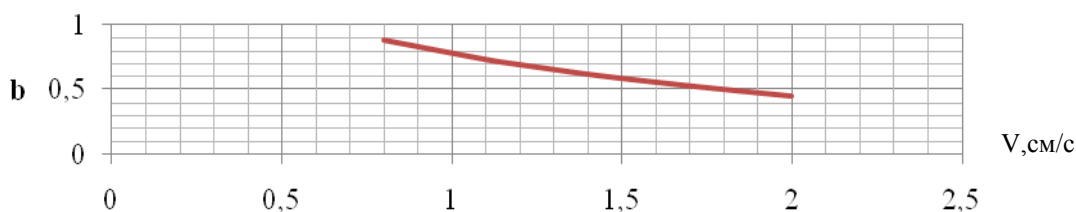


Рисунок 3 – Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від швидкості переміщення лазерного випромінювання відносно заготовки, що обробляється, для зразка № 2

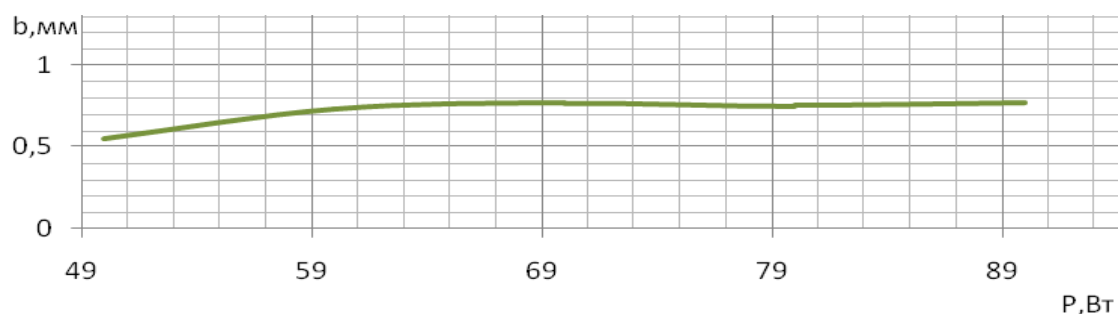


Рисунок 4 – Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від потужності лазерного випромінювання для зразка № 2

Математична модель апроксимуючих сплайн-функцій ширини зварного шва b від швидкості лазерного зварювання і потужності лазерного випромінювання при товщині $\delta = 0,2$ мм для зразка № 3 проведена за таких умов:

- для моделі (1) діапазон зміни швидкості V становить від $0,75 \cdot 10^{-2}$ м/с до $2 \cdot 10^{-2}$ м/с при постійному значенні $P_3 = 60$ Вт;
- для моделі (2) діапазон зміни потужності P становить

від 49 Вт до 99 Вт

при постійному значенні $V_3 = 0,8 \cdot 10^{-2}$ м/с, що мають вигляд відповідно:

$$b_3(V) = -0,1895 V^3 + 0,7943 V^2 - 1,2602 V + 1,3475 \quad (7)$$

$$b_3(P) = 0,000006 P^3 - 0,0014 P^2 + 0,1111 P - 2,3337. \quad (8)$$

На основі математичних моделей апроксимуючої сплайн-функції для залежностей $b_3(V)$ і $b_3(P)$ побудовано знакові моделі для експерименту № 3, які зображено на рисунках 5 і 6 відповідно.

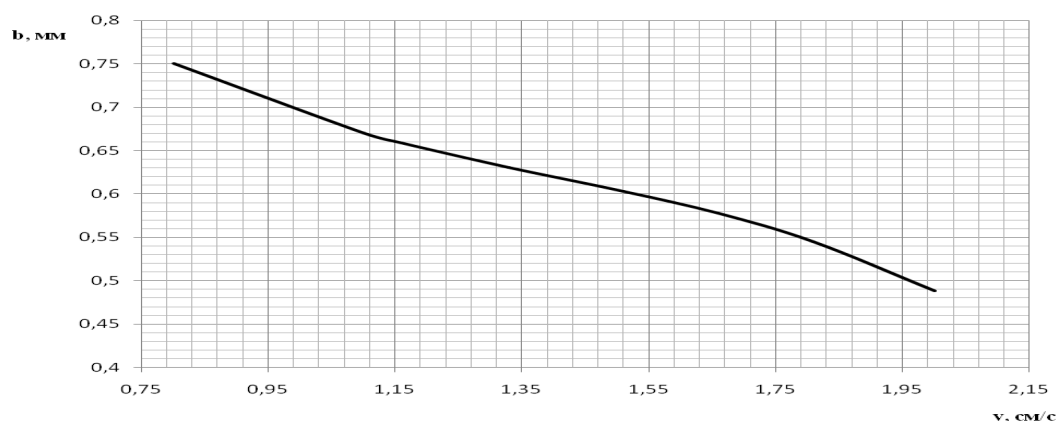


Рисунок 5 – Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від швидкості переміщення лазерного випромінювання відносно заготовки, що обробляється, для зразка № 3

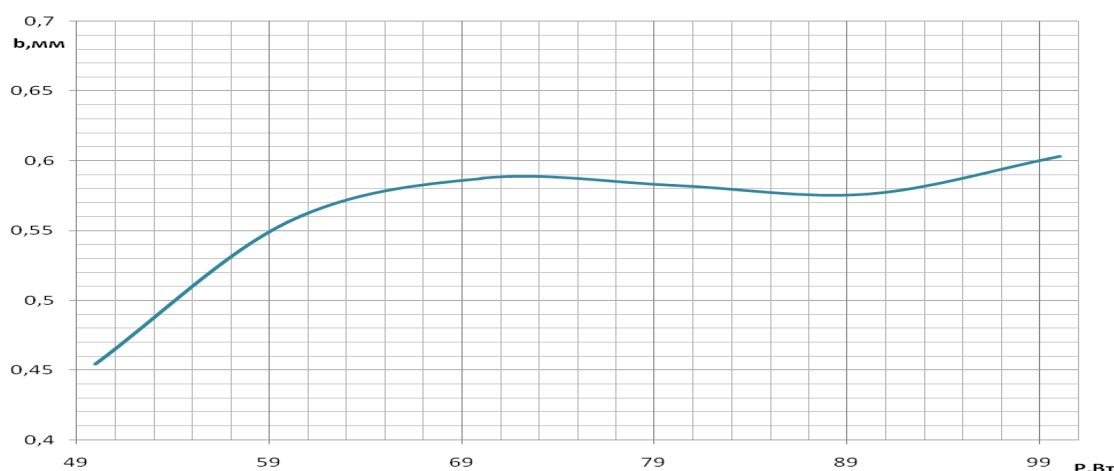


Рисунок 6 – Залежність геометричних розмірів шовного з'єднання b від потужності лазерного випромінювання для зразка № 3

У роботі [12] запропоновано вибір технологічних параметрів процесу зварювання на основі визначення максимального значення ККД. Водночас ця інформаційна технологія передбачає наступні процедури: визначаються оптимальні технологічні параметри лазерного зварювання тонкостінних конструкцій за запропонованим значенням ширини зварного шва $b_{\text{зап}}$; на основі якого експериментальним методом визначається значення швидкості V лазерного зварювання при потужності лазерного випромінювання $P = \text{const}$; проводиться обчислювання значення V_{max} , при якому забезпечується прямокутна геометрія шва; визначається експериментальна залежність $b(P)$ при $V = V_{\text{max}} = \text{const}$; знаходиться точка перетину, при якій залишається майже постійним значення шва b при подальшому збільшенні потужності. Однак відповідні значення потужності, швидкості процесу зварювання та ширини зварного шва вибираються дослідником. Недоліками цього методу є суб'єктивність при прийнятті рішення щодо значень $b_{\text{зап}}$ і велика тривалість перелічених процедур. Тому пропонується графоаналітичний метод визначення оптимальних технологічних параметрів, який створений, використовуючи розроблену інформаційну спеціалізовану базу даних. Графоаналітичний метод визначення одночасно оптимальних значень V , P і b базу-

ється на використанні теорії інформаційної технології при створенні інформаційної спеціалізованої бази даних за результатами експериментального дослідження, на принципі параметричної оптимізації та принципі прийняття рішень в умовах невизначеності, що ґрунтуються на результатах сформованої схеми відношень швидкості лазерного зварювання і ширини зварного шва при постійному значенні потужності лазерного випромінювання та схеми відношень потужності лазерного випромінювання і ширини зварного шва при постійному значенні швидкості лазерного зварювання; синтезу знакових моделей відповідних залежностей $V(b)$ і $P(b)$, побудованих в єдиному квадранті, де єдиною загальною абсцисою є значення зварного шва b . Приклади реалізації цього методу наведено на рисунках 7, 8, 9, де зображено залежності $V(b)$ і $P(b)$ для зразків № 1, № 2, № 3 відповідно, де загальною абсцисою є значення b .

Обговорення результатів. Аналіз інформаційних зображень, представлених на рисунках 7, 8, 9, показав, що процедура визначення відповідних параметрів режиму лазерного зварювання отримана наступним чином: з точок перетину залежностей $V(b)$ та $P(b)$ опускаються перпендикуляри до перетину з відповідними осями V , P , b , значення цих точок відповідають таким параметрам:

$$P_1 = 51,1 \text{ Вт}; V_1 = 1,45 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}; b_1 = 0,83 \text{ мм для зразка № 1};$$

$$P_2 = 58,3 \text{ Вт}; V_2 = 1,67 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}; b_2 = 0,53 \text{ мм для зразка № 2};$$

$$P_3 = 53,1 \text{ Вт}; V_3 = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}; b_3 = 0,6 \text{ мм для зразка № 3}.$$

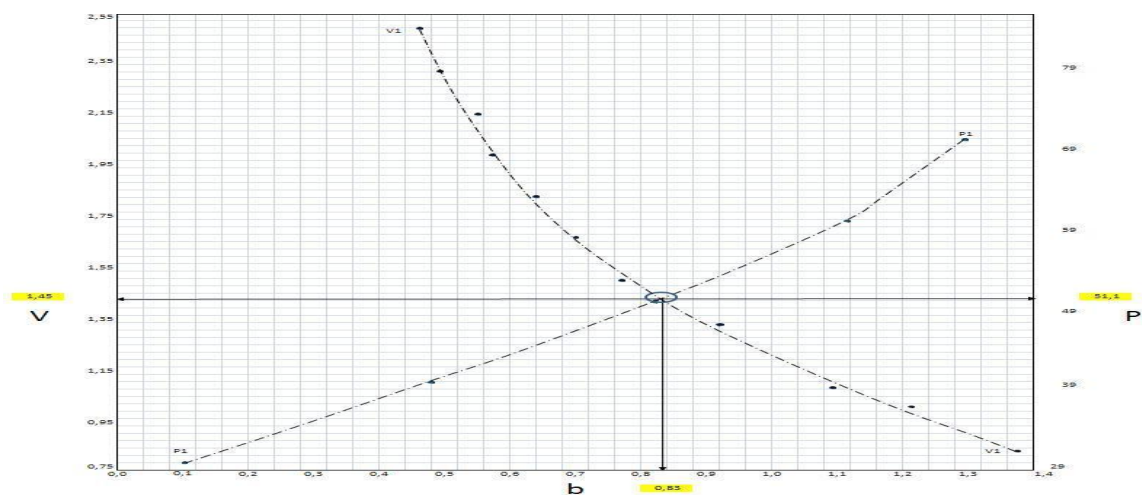


Рисунок 7 – Графіки визначення оптимальних параметрів процесу АЛЗ тонкостінних конструкцій зі сталі 12Х18Н10Т для зразка № 1

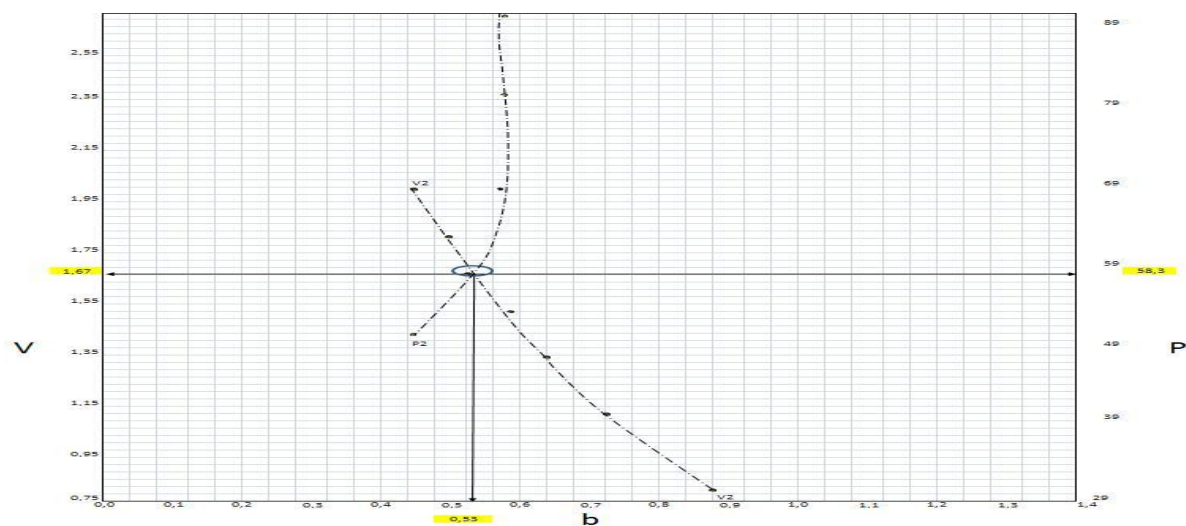


Рисунок 8 – Графіки визначення оптимальних параметрів процесу лазерного зварювання тонкостінних конструкцій зі сталі 1,4541 для зразка № 2

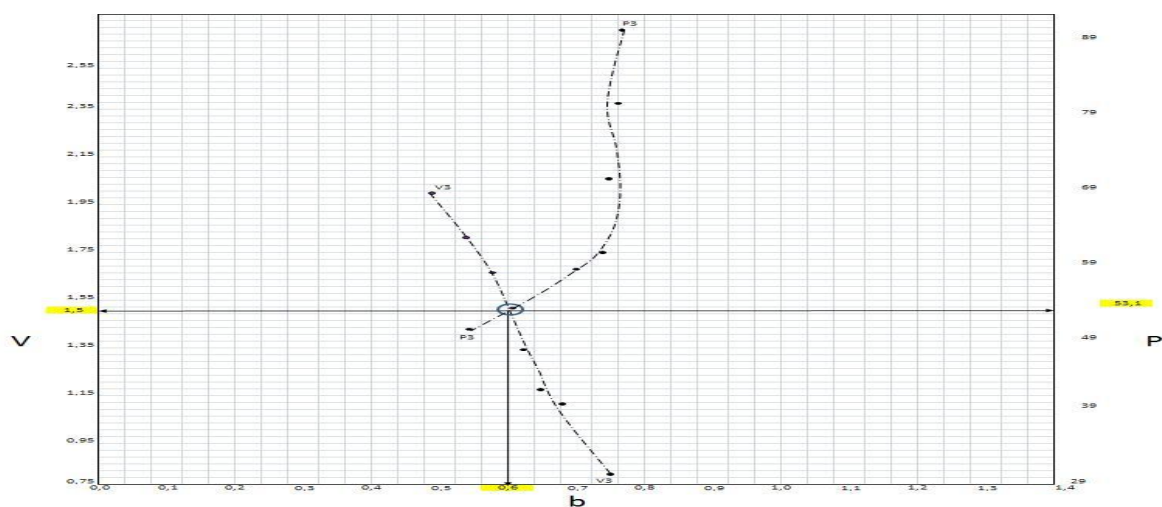


Рисунок 9 – Графіки визначення оптимальних параметрів процесу лазерного зварювання тонкостінних конструкцій зі сталі 1,4541 для зразка № 3

Порівняльний аналіз інформаційних технологій, що використовуються авторами в роботах прототипів, які розглянуті вище, показав, що великою перевагою запропонованого графоаналітичного методу щодо визначення найкращих параметрів режимів автоматизованого лазерного зварювання є простота і відсутність суб'єктивності при визначенні значення b [11, 12]. Крім того, встановлені функціональні залежності між шириною зварного шва, швидкістю і потужністю режимів зварювання на основі апроксимації сплайн-функцій дають можливість прогнозувати значення параметрів V та P при забезпеченні затребуваної геометрії b замовником виробу.

Висновки. У роботі сформульовано, досліджено та вирішено актуальну науково-технічну проблемну задачу підвищення ефективності інформаційної технології параметричної оптимізації режимів автоматизованого лазерного зварювання (АЛЗ) в умовах невизначеності шляхом: розробки інформаційної спеціалізованої бази даних за результатами експериментальних досліджень; створення інформаційної технології аналітичного опису функціональних залежностей між шириною зварного шва і швидкістю та потужністю режимів АЛЗ; прийняття рішення параметричної оптимізації в умовах невизначеності на базі розробленого графоаналітичного методу.

При виконанні роботи отримано нові наукові результати:

1. Розроблено інформаційну спеціалізовану базу даних у вигляді реляційної моделі за результатами експериментальних досліджень. Структуровані інформаційні дані зберігаються, обробляються та передаються для управління процесом автоматизованого лазерного зварювання тонкостінних конструкцій.

Відмітними особливостями є простота і доступність для розуміння користувачем, що зменшує час на підготовчому технологічному етапі.

2. Створено інформаційну технологію аналітичного опису функціональної залежності між шириною зварного шва, швидкістю і потужністю режимів АЛЗ на основі апроксимації сплайн-функціями. Відмітною особливістю запропонованих сплайн-функцій є можливість отримувати оптимальні сплайн-наближення з незакріпленими вузлами при використуванні методу найменших квадратів. Математичні моделі сплайн-функцій, порівняно з наявними інформаційними технологіями, що зберігають інформацію у вигляді двовимірних таблиць, зменшують об'єм пам'яті майже на 40 %, а також сприяють автоматизації обчислювальних процедур, що зменшує час на підготовку параметрів режимів АЛЗ.

3. На базі створеної інформаційної технології аналітичного опису функціональної залежності між основними параметрами режиму АЛЗ та шириною зварного шва розроблено графоаналітичний метод, який дає можливість визначити найкращі параметри режимів АЛЗ сталених тонкостінних конструкцій в умовах невизначеності. Візуалізація результатів забезпечує прискорення прийому інформації людиною майже на два порядки порівняно з іншими методами. Особливість методу полягає в отриманні значення абсцис, які відповідають конкретному значенню ординати, і навпаки. Це зменшує час підготовки відповідної інформації параметричної оптимізації в умовах невизначеності.

Отже, ефективність запропонованої інформаційної технології для параметричної оптимізації режимів автоматизованого лазерного зварювання в умовах невизначеності забезпечується сукупністю отриманих результатів, що перелічено вище, водночас великими перевагами цієї інформаційної технології порівняно з наявними прототипами є простота, легкість освоєння, що забезпечує значне зменшення енергочасових та матеріальних витрат на етапі технологічної підготовки для виготовлення виробу і, як наслідок, зменшується його вартість. Крім того, розширюється наявна інформаційна бібліотека бази знань для фахівців відповідного підприємства, що сприяє підвищенню його продуктивності та якості виробів.

Список використаних джерел

- [1] В. Н. Бернадский, В. Д. Шелягин, и О. К. Маковецкая, "Современный рынок лазерной техники для сварки и обработки материалов", *Автоматическая сварка*, № 10, 2007; "Мобильный аппарат для лазерной сварки", *Ibid.*, № 4, с. 193-194, 2000.
- [2] H. Exner, J. Drechsel, S. Klotzer, und V. Neumann, "Handgeführtes Fügen: Laser-Bearbeitungskopf für mobiles Laserschweißen", *Laser-Prax*, № 3, S. 14-15, 1999; Bd. 1, S. 145-159, 2001.
- [3] S. Keitel, "Manuelles Laserstrahlschweißen-Entwicklungs-prospektiven und

- Standder Anwendung", *Hochleistungs-fuegeverfahren-7 Inter. Aachener Schweisstechnik Kolloquium*, Aachener, Deutschland, 3-4 Mai, 2001.
- [4] "Laserstrahl "Handschweisgerät" LHS-1", *Techn.-inf. Halle: Berichte-SLV*, 2000.
- [5] "Laserstrahl "Handschweisgerät" LHS-2", *Techn.-inf. Halle: Berichte-SLV*, 2000.
- [6] S. Celen, S. Karadeniz, and H. Ozden, "Effect of laser welding parameters on fusion zone morphological, mechanical and microstructural characteristics of AISI 304 stainless steel", *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, № 39, 2008.
- [7] G. Daurelio, F. Memola Capece Minutolo, F. Curcio, and F. Caiazzo, "On the welding of austenitic/ferritic stainless steels by an High Power Diode Laser", *Proc. AMME'2003*, vol. 12, 7-10, pp. 187-190, Dec. 2003.
- [8] A. Nobuyuki, F. Yoshinori, I. Takashi, and T. Masahiro, "Micro welding of thin stainless steel foil with a direct diode laser", *Transactions of JWRI*, vol. 34, no. 1, pp. 19-23, 2005.
- [9] А. Г. Лукашенко, Т. В. Мельниченко, и Д. А. Лукашенко, "Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали модулированным излучением", *Автоматическая сварка*, № 4, с. 19-23, 2012.
- [10] В. Д. Шелягин, А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, В. А. Лукашенко, та В. Ю. Хаскин, "Способ лазерного зварювання з широтно-імпульсною модуляцією випромінювання", МПК (2014.01) В 23К 26/2: пат. на винахід 109328 С2 Україна, № а 2013 14855, заявл. Груд. 18, 2013, опубл. Серп. 10, 2015, Бюл. № 15.
- [11] Д. А. Лукашенко, А. Г. Лукашенко, И. А. Зубко, Р. Е. Юпин, и В. М. Лукашенко, "Оптимальный метод определения параметров режима лазерной сварки тонкостенных конструкций", *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, № 6/5 (54), с. 48-51, 2011.
- [12] В. Д. Шелягин, А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, А. В. Бернацкий, В. П. Гаращук, и В. И. Луценко, "Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали", *Автоматическая сварка*, № 4, с. 45-49, 2011.
- [13] А. Г. Лукашенко, В. Д. Шелягин, та В. М. Лукашенко, "Лазерна технологічна установка АРМА-100М", *Каталог сучасних наукових розробок та послуг ЧДТУ*. Черкаси: ЧДТУ, 2011.
- [14] В. Д. Шелягин, Д. А. Лукашенко, В. Ю. Хаскин, А. Г. Лукашенко, А. В. Сиора, и А. В. Бернацкий, "Сварка тонколистовой нержавеющей стали волоконным лазером", *Вестник ДНУ. Ракетно-космическая техника*, т. 19, № 4, с. 121-129, 2011.
- [15] П. М. Таланчук, М. Н. Фомин, и В. В. Сергеев, *Моделирование и оптимизация на ЭВМ измерительных преобразователей*. Киев: Вища шк., 1991.
- [16] В. Д. Шелягин, А. Г. Лукашенко, Д. А. Лукашенко, В. Ю. Хаскин, О. В. Сиора, та А. В. Бернацкий, "Способ лазерного зварювання", МПК (2012.01) В23К 26/00: пат. 68159 Україна, № у 2011 13985, заявл. Листоп. 28, 2011, опубл. Берез. 12, 2012, Бюл. № 5.
- [17] В. В. Лимаренко, И. П. Хавина, и А. Н. Рисованный, "Постановка и решение задачи параметрической оптимизации операций резания металлов и обработки материалов", *Системы управління, навігації та зв'язку*, Полтава, вип. 4 (44), с. 20-24, 2017.
- [18] В. В. Лимаренко, и И. П. Хавина, "Решение задачи оптимизации параметров обработки металлов при операции точения", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, Харків, вип. 3 (83), с. 77-86, 2017.
- [19] А. В. Бернацкий, В. Д. Шелягин, О. В. Сиора, В. М. Сидорець, та О. М. Берднікова, "Влияние просторового положения при лазерном зварюванні на рівень якості зварних з'єднань зі сталі AISI 321", *Автоматичне зварювання*, № 1, с. 15-24, 2020.
- [20] A. Artinov, N. Bakir, M. Bachmann, A. Gumenyuk, and M. Rethmeier, "Weld pool shape observation in high power laser beam welding". *Procedia CIRP*, no. 74, pp. 683-686, 2018.
- [21] В. М. Нестеренков, Л. А. Кравчук, та М. О. Русиник, "Влияние технологических и металлургических факторов на формирования зварних з'єднань міді при електронно-променевому зварюванні", *Автоматичне зварювання*, № 2, с. 38-42, 2021.
- [22] D. Yu. Yermolenko, V. V. Holovko, and S. M. Stepanuyk, "Cellular automata for simulation of dendritic growth with surface active refractory inoculants", *J. of Achieve-*

ments in Materials and Manufacturing Eng., 88, iss. 2, pp. 49-54, June, 2018.

- [23] В. Ю. Хаскін, В. М. Коржик, Ч. Донг, та Є. В. Ілляшенко, "Підвищення ефективності лазерного зварювання шляхом зворотно-поступального переміщення фокуса", *Автоматичне зварювання*, № 1, с. 57-63, 2020.

References

- [1] V. N. Bernadsky, V. D. Shelyagin, and O. K. Makovetskaya, "Modern market of laser technology for welding and processing of materials", *Avtomaticheskaya svarka*, no. 10, 2007; "Mobile device for laser welding", *Ibid.*, no. 4, pp. 193-194, 2000 [in Russian].
- [2] H. Exner, J. Drechsel, S. Klotzer, und V. Neumann, "Handgefuhrtes Fugen: Laser-Bearbeit-ungskopf fur mobiles Laserschweissen", *Laser-Prax*, № 3, S. 14-15, 1999; Bd. 1, S. 145-159, 2001.
- [3] S. Keitel, "Manuelles Laserstrahlschweipen-Entwicklungs-perspektiven und Standder Anwendung", *Hochlicstungs-fuegeverfahren-7 Inter. Aachener Schweiptechnik Kollo-gium*, Aachener, Dentschland, 3-4 Mai, 2001.
- [4] "Laserstrahl "Handschweissgerat" LHSG-1", *Techn.-inf. Halle: Berichte-SLV*, 2000.
- [5] "Laserstrahl "Handschweissgerat" LHSG-2", *Techn.-inf. Halle: Berichte-SLV*, 2000.
- [6] S. Celen, S. Karadeniz, and H. Ozden, "Effect of laser welding parameters on fusion zone morphological, mechanical and microstructural characteristics of AISI 304 stainless steel", *Materialwissenschaft und Werkstoff-technik*, № 39, 2008.
- [7] G. Daurelio, F. Memola Capece Minutolo, F. Curcio, and F. Caiazzo, "On the welding of austenitic/ferritic stainless steels by an High Power Diode Laser", *Proc. AMME'2003*, vol. 12, 7-10, pp. 187-190, December 2003.
- [8] A. Nobuyuki, F. Yoshinori, I. Takashi, and T. Masahiro, "Micro welding of thin stainless steel foil with a direct diode laser", *Transactions of JWRI*, vol. 34, no. 1, pp. 19-23, 2005.
- [9] A. G. Lukashenko, T. V. Melnichenko, and D. A. Lukashenko, "Laser welding of thin sheet stainless steel with modulated radiation", *Avtomaticheskaya svarka*, no. 4, pp. 19-23, 2012 [in Russian].
- [10] V. D. Shelyagin, A. G. Lukashenko, D. A. Lukashenko, V. A. Lukashenko, and V. Yu. Haskin, "Method of laser welding with pulse-width modulation of radiation", IPC (2014.01) B 23K 26/2: patent on the invention 109328 C2 Ukraine, no. a 2013 14855, appl. Dec. 18, 2013, publ. Aug. 10, 2015, Bull. no. 15 [in Ukrainian].
- [11] D. A. Lukashenko, A. G. Lukashenko, I. A. Zubko, R. E. Yupin, and V. M. Lukashenko, "Optimal method for determining the parameters of laser welding of thin-walled structures", *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, no. 6/5 (54), pp. 48-51, 2011 [in Russian].
- [12] V. D. Shelyagin, A. G. Lukashenko, D. A. Lukashenko, A. V. Bernatskiy, V. P. Garashchuk, and V. I. Lutsenko, "Laser welding of thin sheet stainless steel", *Avtomaticheskaya svarka*, no. 4, pp. 45-49, 2011 [in Russian].
- [13] A. G. Lukashenko, V. D. Shelyagin, and V. M. Lukashenko, "Laser technological installation ARMA-100M", *Catalog of modern scientific developments and services of ChSTU*. Cherkasy: ChDTU, 2011 [in Ukrainian].
- [14] V. D. Shelyagin, D. A. Lukashenko, V. Yu. Khaskin, A. G. Lukashenko, A. V. Siora, and A. V. Bernatskiy, "Welding of thin-sheet stainless steel with a fiber laser", *Vestnik DNU. Raketno-kosmicheskaya tekhnika*, vol. 19, no. 4, pp. 121-129, 2011 [in Russian].
- [15] P. M. Talanchuk, M. N. Fomin, and V. V. Sergeev, *Computer modeling and optimization of measuring converters*. Kiev: Vischa shkola, 1991 [in Russian].
- [16] V. D. Shelyagin, A. G. Lukashenko, D. A. Lukashenko, V. Yu. Haskin, O. V. Siora, and A. V. Bernatskiy, "Method of laser welding", IPC (2012.01) B23K 26/00: patent 68159 Ukraine, no. u 2011 13985, appl. Nov. 28, 2011, publ. March 12, 2012, Bull. no. 5 [in Ukrainian].
- [17] V. V. Limarenko, I. P. Khavina, and A. N. Risovanny, "Formulation and solution of the task for parametric optimization of metal cutting and material processing operations", *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, Poltava, iss. 4 (44), pp. 20-24, 2017 [in Russian].

- [18] V. V. Limarenko, and I. P. Khavina, "Solution of the problem of optimization of metalworking parameters during turning operations", *Radioelektronni i kompiuterni systemy* Kharkiv, iss. 3 (83), pp. 77-86, 2017 [in Russian].
- [19] A. V. Bernatsky, V. D. Shelyagin, O. V. Siora, V. M. Sydorets, and O. M. Berdnikov, "Influence of spatial position during laser welding on the level of quality of welded joints made of AISI 321 steel", *Avtomatychne zvariuvannia*, no. 1, pp. 15-24, 2020 [in Ukrainian].
- [20] A. Artinov, N. Bakir, M. Bachmann, A. Gumenyuk, and M. Rethmeier, "Weld pool shape observation in high power laser beam welding". *Procedia CIRP*, no. 74, pp. 683-686, 2018.
- [21] V. M. Nesterenkov, L. A. Kravchuk, and M. O. Rusynyk, "Influence of technological and metallurgical factors on the formation of welded copper joints in electron beam welding", *Avtomatychne zvariuvannia*, no. 2, pp. 38-42, 2021 [in Ukrainian].
- [22] D. Yu. Yermolenko, V. V. Holovko, and S. M. Stepanuyk, "Cellular automata for simulation of dendritic growth with surface active refractory inoculants", *J. of Achievements in Materials and Manufacturing Eng.*, 88, iss. 2, pp. 49-54, June, 2018.
- [23] V. Yu. Haskin, V. M. Korzhik, Ch. Dong, and Ye. V. Ilyashenko, "Increase of the efficiency of laser welding by reciprocating focus shift", *Avtomatychne zvariuvannia*, no. 1, pp. 57-63, 2020 [in Ukrainian].

D. A. Harder

Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

INFORMATION TECHNOLOGY OF PARAMETRIC OPTIMIZATION OF MODES OF AUTOMATED LASER WELDING IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY

In this work, the problem of increasing the efficiency of information technology of parametric optimization under conditions of uncertainty for the modes of the process of automated laser welding of thin-walled steel structures is solved. Positive results have been achieved through the development of a specialized information database based on the results of experimental research. An information technology has been created for the analytical description of functional dependencies between the width of the weld and the speed of movement of the modulated laser radiation relative to the workpiece being processed at a constant radiation power; between the width of the weld and the laser radiation power at a constant motion speed.

Mathematical models of spline functions contribute to the automation of computational procedures, which reduces the time for determining the parameters for the laser welding mode and the amount of memory in the control microprocessor. The principle of decision-making for parametric optimization in conditions of uncertainty on the basis of the developed graph-analytical method is proposed. The method uses a graphic representation of spline functions built in a single quadrant with a common abscissa, the values of which correspond to the values of the weld. Coordinates of the point of intersection of functional dependencies on ordinates and abscissa determine the corresponding optimal parameters of the automated laser welding mode. Visualization of the principle of parametric optimization in conditions of uncertainty accelerates the process of technological preparation of production, which contributes to an increase in the productivity of the enterprise.

Keywords: laser, constructions, uncertainty conditions, graphoanalytical method, parametric optimization.

В. Г. Руденко, магістр,
 [0000-0002-6885-3662] **І. М. Іваненко, к.х.н., доцент,**
 [0000-0002-9795-7110] **І. В. Косогіна, к.т.н., доцент,**
 e-mail: kosoginairyna@gmail.com
 [0000-0003-2415-8032] **А. П. Бурмак, к.т.н.**

Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
 просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

НОВИЙ ЕФЕКТИВНИЙ ВУГЛЕЦЕВИЙ АДСОРБЕНТ ДЛЯ ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ВОДИ

Отримано Ni-вмісний вуглецевий адсорбент на основі попередньо окисненого нітратною кислотою активованого вугілля з наступною модифікацією нікелем. Хімія поверхні синтезованого вуглецевого адсорбенту має поліфункціональний характер з високою аніоно- та катіонообмінною ємністю та у три рази вищою адсорбційною ємністю щодо іонів Fe^{3+} порівняно з вихідним активованим вугіллям марки Norit SAE SUPER. Підвищення адсорбційної активності пояснюється збільшенням сили π -супрешеної електронної системи за рахунок введення у вугільну матрицю додаткових електронів від атома нікелю, що створює умови для його орбітальних та індукційних взаємодій з йонами феруму. Модифікування поверхні вуглецевого адсорбенту нікелем привело до появи магнітних властивостей синтезованого матеріалу, що сприяло збільшенню концентрації іонів Fe^{3+} у приповерхневому шарі адсорбенту. Як наслідок модифікування поверхні нікелем спостерігається зростання адсорбційної ємності матеріалу щодо сполук заліза від ~ 117 мг/г до 750 мг/г для модифікованого вуглецевого матеріалу порівняно з вихідним вугіллям. Процес адсорбції на отриманому Ni-вмісному вуглецевому адсорбенті адекватно описується моделлю Ленгмюра. Запропоновано використовувати синтезований матеріал в технології очищення води з високою концентрацією сполук заліза у такій комбінації стадій: аерація, фільтрування на механічному фільтрі, іонний обмін на сучасному матеріалі Esotix A. За таких умов ефективність очищення води від сполук заліза в лабораторних умовах становила 99,8 %.

Ключові слова: активоване вугілля, модифікування, Ni-вмісний адсорбент, адсорбційна ємність, очищення води, сполуки заліза.

Вступ. Помилкове уявлення про чистоту підземних вод часто не тільки стає причиною неочікуваних збоїв у роботі котельного обладнання та побутової техніки, але й призводить до численних проблем зі здоров'ям. Головною перевагою підземних вод є їх порівняно менша забрудненість та більша захищеність від потрапляння забруднень антропогенного характеру. Для підземних вод характерний значний вміст мінеральних солей та невеликий, порівняно з поверхневими водами, вміст органічних речовин. Однією з основних проблем використання підземних вод для побутових та питних потреб в Україні є високий вміст у них розчинених сполук заліза [1].

Переважаючою формою існування заліза у підземних водах є ферум (II) гідрокарбонат, який стійкий лише за наявності значної кількості вуглекислоти і відсутності розчиненого кисню. Крім того, залізо трапляється у вигляді

ферум (II) сульфідів, карбонатів і сульфатів, комплексних сполук з гуміновими та фульфовими кислотами [2].

Залізо з підземних вод видаляють методами, які можна поділити на реагентні та безреагентні. Недоліком реагентних методів знезалізнання води є утворення проміжних хімічних сполук та високі експлуатаційні витрати на реагентне господарство, тому для знезалізнання води все частіше намагаються використовувати безреагентні методи. Серед безреагентних методів знезалізнання води широкого застосування набули спрощена аерація з наступним фільтруванням, вакуумно-ежекційна аерація з фільтруванням, «сухе» фільтрування, фільтрування на каркасних фільтрах, глибока аерація та двоступеневе фільтрування тощо. Однак нові сучасні матеріали комплексної дії для видалення заліза (зокрема гібридні сорбенти) поступово набувають все більшої популярності [3].

Одним із прикладів гібридних адсорбентів є залізоселективні на основі аніонітів, модифікованих гуміновими речовинами. Застосування таких сорбентів дає змогу досягти глибокого видалення з природної води як Fe (III), так і Fe (II) без використання методів попереднього окиснення двовалентного феруму. Встановлено, що модифікована гуміновими речовинами поверхня аніонітів набуває підвищеної спорідненості до акваасоціатів Fe (II), в результаті чого ці домішки адсорбуються на активних центрах поверхні, а потім легко окиснюються киснем, розчиненим у воді. Надалі процес адсорбції розвивається на попередньо сформованому шарі адсорбату [4].

Принципово новим підходом до застосування іонітів у водоочищенні стало їх використання у складі багатокомпонентних фільтруючих завантажень комплексної дії, які мають іонообмінні, сорбційні та фільтраційні властивості. Вперше цей підхід був розроблений в Україні і отримав широке застосування як технологія комплексного очищення природних вод під торговельною маркою Ecomix [5].

У технології водоочищення набули широкого застосування природні мінерали (цеоліт, клиноптилоліт, палигорський), які мають високу адсорбційну та іонообмінну здатність щодо забрудників як органічного, так і неорганічного походження. Очищення води на таких матеріалах складається з сукупності декількох процесів: фізичної і хімічної сорбції, йонного обміну та осадження. При очищенні води від йонів важких металів процес закріплення катіонів важких металів на цеоліті в переважній більшості випадків перебігає за механізмом йонного обміну та хемосорбції, як представлено в [6, 7].

Для збільшення адсорбційної ємності цеолітів щодо сполук різного типу зазвичай здійснюють їх механічну, термічну або хімічну обробку. В результаті обробки покращується не тільки адсорбційна здатність цеолітів, але й їх фізико-хімічні властивості через усунення домішок зі складу нативних матеріалів. Наприклад, високу ефективність щодо сполук заліза та марганцю показали термічно активовані природні цеоліти. Сумісне видалення сполук Fe та Mn перебігає з утворенням моношару на поверхні активованого природного цеоліту, як довели автори роботи [8].

Часто в технології водоочищення використовують природний мінерал клиноптило-

літ. При поєднанні клиноптилоліту з кремнеземним піском спостерігається підвищення ефективності видалення сполук заліза, алюмінію, міді та амонійного азоту, що пов'язано зі збільшенням в 1,5 разу пористості та адсорбційної ємності суміші клиноптилоліту з піском порівняно зі значеннями для фільтруючого піску, що відповідає вимогам до гранульованих фільтруючих матеріалів [9].

Дуже часто для видалення заліза з води використовують контактну фільтрацію, а саме фільтрацію на марганцевих фільтрах. Додавання перманганату калію утворює покриття на поверхні фільтра, яке слугує каталізатором окиснення. Ступінь окиснення поверхневого шару MnO_x відіграє важливу роль у видаленні розчиненого заліза [10].

Автори роботи [11] вивчали зернисте завантаження, вкрите сумішшю гематиту (Fe_2O_3), магнетиту (Fe_3O_4), гетиту ($\alpha-FeOOH$) та сидериту ($FeCO_3$). Вони з'ясували, що утворення плівки із сполук феруму на поверхні носія приводить до появи магнітних властивостей матеріалу і, як наслідок, до збільшення його адсорбційної ємності.

Використання відходів є одним із можливих напрямів створення економічно доцільних, ефективних, стійких «зелених» сорбентів у технології водоочищення. Одним із прикладів застосування таких матеріалів для видалення сполук марганцю і заліза може бути біовугілля, отримане з бананової шкірки, попередньо обробленої фосфатною кислотою. Авторами [12] встановлено, що видалення сполук марганцю перебігає полішарово і адекватно описується моделлю Фрейндліха, а сумісне вилучення марганцю і феруму перебігає з утворенням моношару і адекватно описується моделлю Ленгмюра.

Застосування в технології водоочищення нових нанорозмірних матеріалів та композитів на їх основі є перспективним напрямом збільшення питомої поверхні сорбційних матеріалів та надання їм нових функціональних властивостей. В результаті включення певних функціональних груп у структуру носія такі наноматеріали (матеріали на основі оксидів металів, дендримери, цеоліти тощо) набувають більш розвиненої поверхні і стають більш ефективними. Наприклад, використання глини, модифікованих сполуками нікелю, дає можливість отримати матеріал, високоефективний щодо забрудників органічної природи, як довели автори роботи [13].

Для збільшення питомої поверхні матеріалу як носій використовують не тільки природні матеріали, а й активоване вугілля, модифікування поверхні якого може забезпечити підвищення ефективності адсорбційного вилучення отриманих композитів щодо забрудників органічної та неорганічної природи. Введення в структуру активованого вугілля Ni та NiO дає змогу отримати контрольовану структуру, надає сорбційному матеріалу діелектричних та магнітних властивостей і забезпечує повноту його відділення від очищеної води, як показано в [14-16].

Допування поверхні поруватих матеріалів сполуками заліза та нікелю також здійснюють з метою запобігання агломеруванню частинок композитів, що також сприяє збільшенню адсорбційної ємності носія та приводить до появи магнітних властивостей, що вивчалось в [17].

До того ж, як продемонстрували автори роботи [18], допування поверхні активованого вугілля сполуками кобальту забезпечує отримання нанорозмірного адсорбційного матеріалу високої магнітної сили і розвиненої поруватості.

Мета дослідження – синтез нового адсорбційного матеріалу на основі активованого вугілля, модифікованого нікелем, його характеристика та дослідження його ефективності в процесі знезалізнення води.

Обладнання. Ідентифікацію фазового складу проводили за допомогою рентгенівського порошкового дифрактометра TTR3 Rigaku (Японія) з випромінюванням Cu Ka ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), 30 мА та 30 кВ у сертифікованій лабораторії RIGAKU інженерно-хімічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Термічний аналіз зразків проводили в кисневому середовищі на термоаналізаторі Derivatigraf Q-1500 (MOM, Угорщина) в малому платиновому тиглі з використанням прожареного Al_2O_3 як еталону. Швидкості нагріву та температурні інтервали дослідження вказані при описі одержаних даних.

Спектрофотометричні дослідження виконували на однопроменевому спектрофотометрі inSpect-101UV з програмним забезпеченням UV Professional.

Методика окиснення активованого вугілля. Як вихідне активоване вугілля використовували порошкове активоване вугілля марки Norit SAE SUPER [19]. Для отримання його окисненої форми застосовували метод

кип'ятіння з нітратною кислотою з подальшим відмиванням. Для цього термостійку круглодонну колбу із 25 г вихідного активованого вугілля, 200 см³ 65 %-ї нітратної кислоти та 200 см³ дистильованої води нагрівали до кипіння та витримували при слабкому кипінні зі зворотним холодильником протягом двох годин. Потім вміст колби охолоджували і промивали спочатку слабким лужним розчином, а потім дистильованою водою до нейтрального значення pH, після чого отримане окиснене активне вугілля ($\text{AB}_{\text{ок}}$) висушували.

Методика модифікування нікелем окисненого вугілля. Нікельвмісні зразки отримували методом імпрегнування окисненого активованого вугілля нікель (II) нітратом з подальшим відновленням за допомогою гідрозину в інертному середовищі. Для цього 1 г окисненого вугілля диспергували в 50 см³ етилового спирту на ультразвуковій бані, додавали розраховану кількість нікель (II) нітрату і перемішували до повного розчинення. Далі через отриману суміш пропускали газоподібний азот, щоб створити інертне середовище та витіснити повітря, колбу герметично закривали та ставили на нагрівання з перемішуванням. Після того, як температура суспензії досягала 75 °C, до суміші по краплях додавали лужний розчин гідрозину і залишали при перемішуванні з нагріванням для повної хімічної взаємодії. Отриманий зразок модифікованого нікелем окисненого активованого вугілля ($\text{AB}_{\text{ок}}+\text{Ni}$) промивали етиловим спиртом, потім дистильованою водою і висушували.

Ізотерми адсорбції. Для вивчення адсорбційної здатності отриманих зразків у колби з розчинами заліза (FeSO_4) різної концентрації всипали 0,1 г досліджуваного вугілля, ретельно перемішували і залишали на добу. Після цього фільтрували через паперові фільтри і визначали рівноважну концентрацію фотокolorиметричним методом. Питому адсорбцію розраховували за формулою:

$$\Gamma = \frac{V(C_0 - C_p)}{m},$$

де V – об'єм розчину заліза (III), дм³;

C_0 – початкова концентрація заліза у розчині, мг/дм³;

C_p – рівноважна концентрація заліза у розчині, мг/дм³;

m – наважка дослідженого вугілля, г.

Визначення статичної обмінної ємності та функціонального складу поверхні. Для визначення катіонної статичної обмінної ємності у колби поміщали 1 г активного вугілля, заливали 50 см³ 0,1 н розчину NaOH, а для визначення аніонної статичної обмінної ємності – 50 см³ 0,1 н HCl, колби герметично закривали, струшували і залишали на добу. Після цього розчини фільтрували через паперові фільтри, відбирали 10 см³ фільтрату у колбу для титрування і доводили об'єм розчинів дистильованою водою до 50 см³. Для визначення КСОЕ титрування проводили 0,1 н розчином HCl в присутності індикатора метилового червоного до зміни забарвлення з жовтого на червоне, а для визначення АСОЕ – 0,1 н NaOH з фенолфталеїном до появи ледь помітного забарвлення.

Для визначення вмісту карбоксильних, фенольних та лактонних груп 1 г зразків адсорбентів поміщали в колби, заливали 0,1 н розчинами NaOH, Na₂CO₃, NaHCO₃, відповідно, і струшували протягом однієї доби. Потім фільтрували, відбирали аліквоту фільтрату об'ємом 10 см³ і титрували 0,1 н HCl з метиловим червоним [20]. Ємність розраховували за формулою:

$$COE = \frac{V(C_{поч} - C_{кін})}{1000 \cdot m},$$

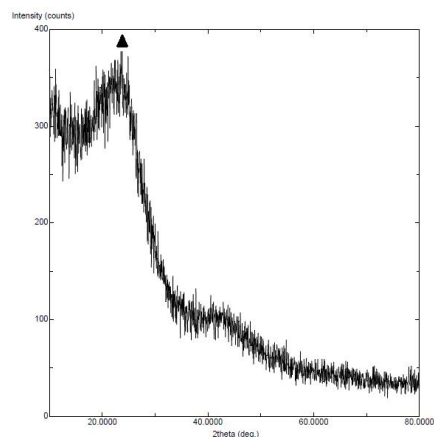
де $C_{поч}$ і $C_{кін}$ – початкова та кінцева концентрація розчину, що використовувався для нейтралізації, мг-екв/г;

V – об'єм розчину, взятий для нейтралізації, см³;

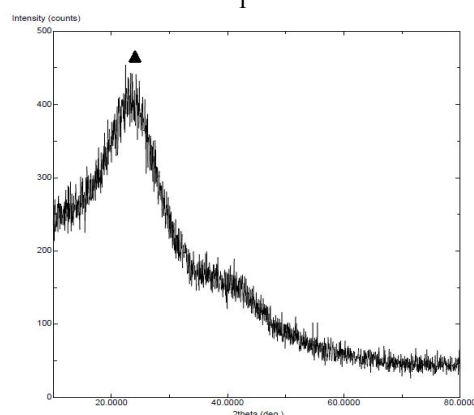
m – маса наважки, г.

Результати досліджень та їх обговорення. Результати рентгенофазового аналізу (прилад Ultima IV Rigaku (Японія)) вихідного активованого вугілля, його окисненої форми та модифікованого нікелем зразка зображені на рисунку 1.

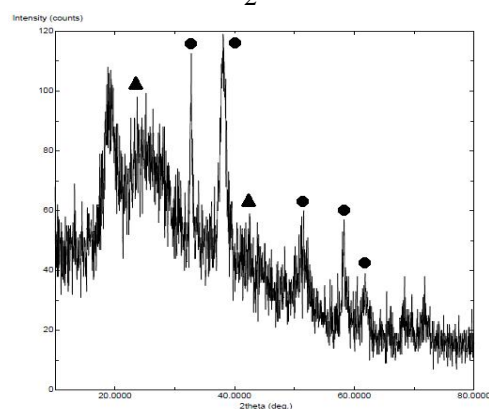
Як видно на рисунках 1-1 та 1-2, і вихідне активоване вугілля, і його окиснена модифікація є рентгеноаморфними. Єдиний широкий максимум на цих дифрактограмах належить карбону, що переважно міститься у цих адсорбентах, згідно зі Стандартною карткою № 00-001-0640 (International Centre for Diffraction Data).



1



2



3

1 – AB_{вих}; 2 – AB_{ок}; 3 – AB_{ок}+Ni

Рисунок 1 – Дифрактограми досліджених адсорбентів

На дифрактограмі модифікованого нікелем окисненого активного вугілля на рисунку 1-3 присутні кілька максимумів, які за стандартною картотекою International Centre for Diffraction Data (картка № 00-001-1258) належать чистому металічному нікелю.

З метою визначення точного вмісту нікелю в отриманому модифікованому нікелем зразку було проведено його комплексний термічний аналіз, результати якого зображено на рисунку 2.

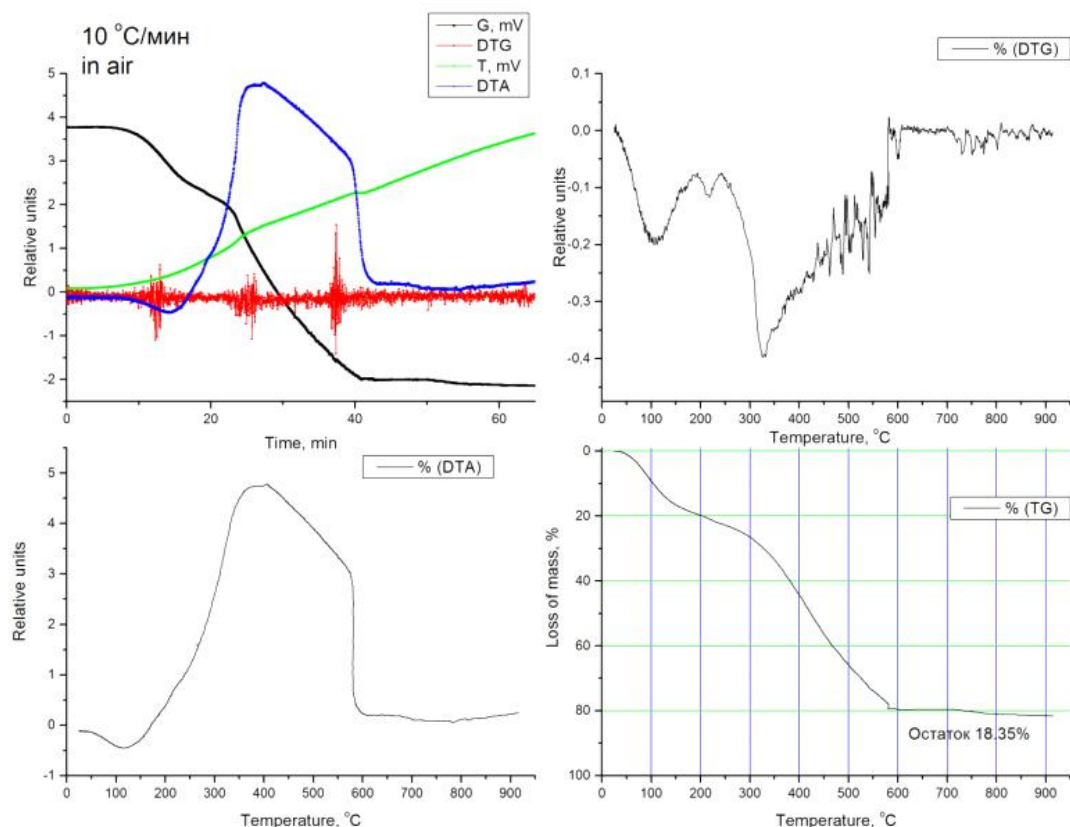


Рисунок 2 – Результати комплексного термічного аналізу модифікованого нікелем активованого вугілля

Термічний аналіз показав безперервну втрату маси модифікованого нікелем активованого вугілля в інтервалі температур 50-580 °C. У діапазоні температур від 50 до 200 °C втрата маси зразку становить 22 %, що пояснюється випаровуванням фізично і хімічно зв'язаної води. Інтенсивна втрата маси зразка на 58 % спостерігається в діапазоні температур від 200 до 580 °C. Вона відбувається завдяки руйнуванню спочатку поверхневих функціональних груп, а потім внаслідок окиснення до CO і CO₂ киснем

повітря карбону у складі активованого вугілля.

За температури вище 580 °C суттєвої втрати маси не спостерігалось. Залишок після прожарювання становив 18,35 %; він показує реальний вміст нікелю в синтезованому зразку.

В таблиці 1 представлено результати визначення питомої площі поверхні та сумарного об'єму пор вихідного активованого вугілля і синтезованих на його основі модифікованих зразків.

Таблиця 1 – Питома площа поверхні та сумарний об'єм пор досліджених адсорбентів

Зразок	$S_{\text{пит}}, \text{м}^2/\text{г}$	$V_{\Sigma}, \text{см}^3/\text{г}$
AB _{вих}	1150	0,78
AB _{ок}	640	0,45
AB _{ок} +Ni	511	0,25

Як видно в таблиці 1, окиснена форма вихідного активованого вугілля (AB_{ок}) майже вдвічі втрачає свою внутрішню поверхню і на

42 % – сумарну поруватість. Такі зміни внутрішньої поруватості системи пояснюються, на нашу думку, розростанням (збільшенням

кількості і діаметру) найдрібніших пор активованого вугілля до макророзмірів внаслідок інтенсивного окиснення нітратною кислотою. А макропори, як відомо, в адсорбції (в тому числі, азоту, що використовується в цьому методі аналізу) не задіяні.

Подальше зменшення питомої площі поверхні після модифікування окисненого активованого вугілля нікелем пояснюється

тим, що металевий нікель, який утворюється в процесі відновлення імпрегнованого нікель (II) нітрату, осаджується на внутрішній поверхні вугільних мезопор, частка яких у сумарній поруватості – дуже суттєва.

Характеризацію поверхні зразків вихідного активного вугілля та його модифікованих зразків здійснювали методом Боема. Результати цього дослідження подано в таблиці 2.

Таблиця 2 – Характеризація поверхні досліджених адсорбентів

Зразок	АСОЕ, ммоль/г	КСОЕ, ммоль/г	Карбоксильні групи, ммоль/г	Фенольні групи, ммоль/г	Лактонні групи, ммоль/г
AB _{вих}	1,0	0,9	0,9	0,4	0,5
AB _{ок}	-	1,1	-	-	-
AB _{ок} +Ni	3,0	2,3	1,8	0,5	1,5

Як видно з таблиці 2, вихідне активоване вугілля має як аніонну, так і катіонну обмінну ємність майже рівною мірою. Причому катіонообмінні групи на поверхні вихідного вугілля представлені всіма трьома різновидами поверхневих функціональних груп, серед яких карбоксильних найбільше.

В окисненому активованому вугіллі аніонообмінні групи відсутні, наявні лише катіонообмінні, кількість яких збільшилась після обробки нітратною кислотою. Вміст окремих кислотних функціональних груп в окисненому вугіллі визначити не вдалось.

Після модифікування нікелем окисненого вугілля вміст аніонообмінних груп на його поверхні збільшується втричі, а катіонообмінних – у 2,5 рази. Причому зростання катіонообмінної ємності відбувається за рахунок карбоксильних і лактонних функціональних груп, а кількість фенольних не змінюється, як це видно в таблиці 2.

В таблиці 3 подано значення рН водної суспензії вихідного активованого вугілля і синтезованих на його основі модифікованих зразків.

Внаслідок окиснення вихідного активного вугілля нітратною кислотою нейтральне за своєю природою активне вугілля підкиснюється на 1,5 одиниці рН. А наступне введення нікелю приводить до зміщення значення рН поверхні в лужне середовище. Це

означає, що синтезоване модифіковане металічним нікелем вугілля має лужну реакцію і підходить для очищення вод, що мають кисле середовище.

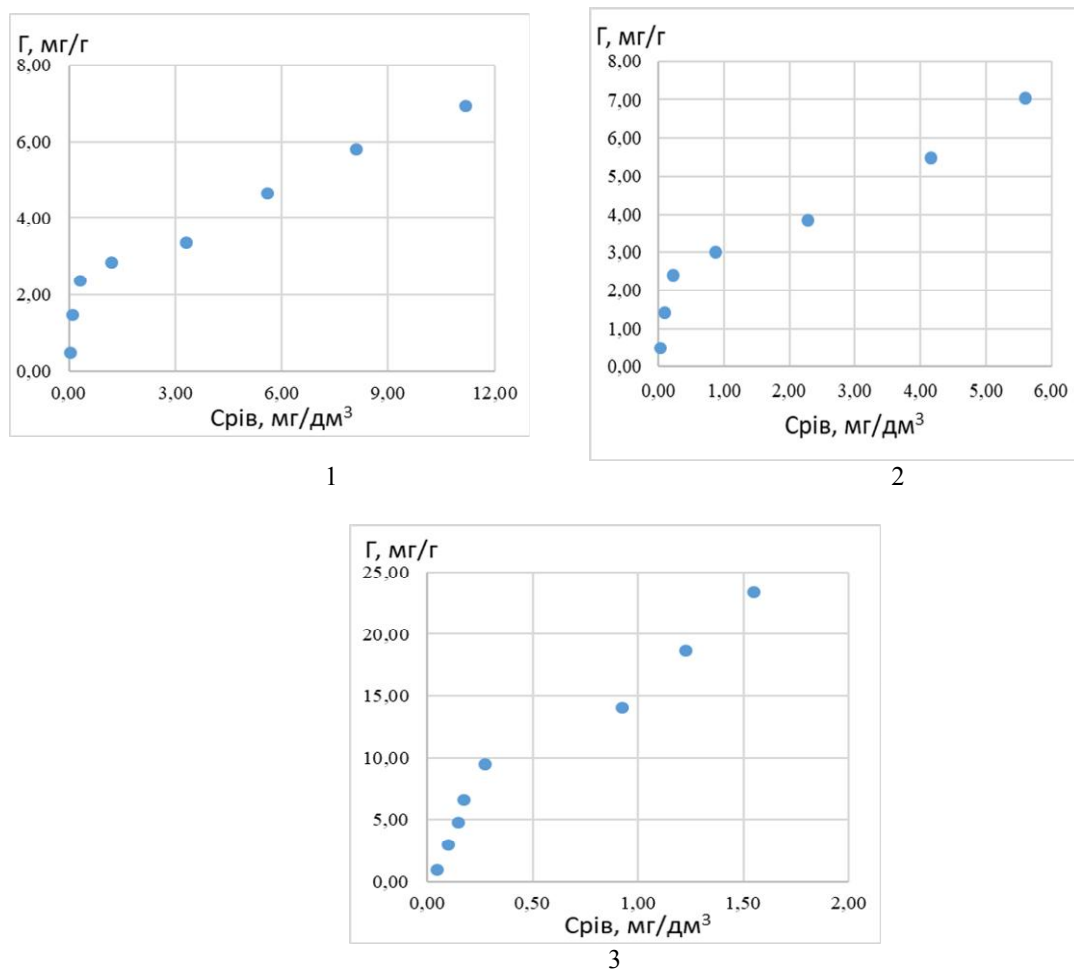
Таблиця 3 – рН водної суспензії досліджених адсорбентів

Зразок	рН
AB _{вих}	6,4
AB _{ок}	4,7
AB _{ок} +Ni	9,9

У представленому дослідженні було здійснено перевірку ефективності застосування модифікованого нікелем попередньо окисненого активованого вугілля щодо сполук заліза. Ізотерми адсорбції феруму з низькоконцентрованих розчинів вихідним, окисненим та модифікованим нікелем активним вугіллям зображено на рисунку 3.

Здійснено математичну обробку отриманих ізотерм за моделями Ленгмюра та Фрейндліха, розраховані константи наведено у таблиці 4.

Відповідно до отриманих результатів (таблиця 4) окиснене активне вугілля, що модифіковане металічним нікелем, має найвищу ємність моношару, що підтверджує його високі адсорбційні властивості щодо іонів заліза.



1 – AB_{вих}; 2 – AB_{ок}; 3 – AB_{ок}+Ni

Рисунок 3 – Ізотерми адсорбції заліза на різних зразках

Для встановлення стабільності процесів очищення води від сполук заліза в потенційній технології, яка включає три основні стадії, а саме: аерацію з фільтруванням, адсорбцію та йонний обмін, було проведено дослідження з різними послідовностями стадій процесу очищення води. Після кожного процесу та наприкінці експерименту визначали залишковий вміст Fe_{заг} фотоколориметричним методом. Результати дослідів подано в таблиці 5.

Згідно з результатами, представленими в таблиці 5, у технології видалення заліза з розчинів концентрації 25 мг/дм³ доцільною є наступна послідовність стадій: 1) аерація забрудненої води з наступним фільтруванням на механічному фільтрі; 2) адсорбційне очищення води на модифікованому адсорбенті; 3) пом'якшення води методом йонного обміну шляхом фільтрування води через комплексний матеріал Есотіх А [21].

Таблиця 4 – Константи Ленгмюра та Фрейндліха для ізотерм адсорбції заліза

Зразок	Константи Ленгмюра		Константи Фрейндліха	
	Γ_{∞} , мг/г	K_L , дм³/г	K_F , дм³/г	n
AB _{вих}	117,42	$9,86 \cdot 10^{-3}$	$3,06 \cdot 10^4$	0,456
AB _{ок}	359,83	$6,70 \cdot 10^{-2}$	$8,52 \cdot 10^3$	0,521
AB _{ок} +Ni	749,96	$6,94 \cdot 10^{-2}$	$3,17 \cdot 10^2$	0,697

Таблиця 5 – Встановлення послідовностей технологічних стадій

№ стадії	Назва процесу	Початкова концентрація $Fe_{заг}$, мг/дм ³	Кінцева концентрація $Fe_{заг}$, мг/дм ³
Технологічний режим 1			
1	Аерація + фільтрування	25	9,13
2	Іонний обмін	9,13	2,5
3	Адсорбція	2,5	0,375
Технологічний режим 2			
1	Аерація + фільтрування	25	10
2	Адсорбція	10	4,5
3	Іонний обмін	4,5	0,05

Висновки. На основі промислового активованого вугілля було синтезовано адсорбент, що являє собою окиснене активоване вугілля, модифіковане нікелем. У складі вуглецевого адсорбенту методом рентгенофазового аналізу було ідентифіковано чисту фазу металічного нікелю. Хімія поверхні синтезованого адсорбенту має поліфункціональний характер з високою аніоно- та катіонообмінною ємністю, остання представлена переважно карбоксильними групами. Внаслідок модифікування площа поверхні активованого вугілля зменшилась у два рази, а сумарний об'єм пор – у три рази. Незважаючи на це, модифіковане нікелем активоване вугілля показало адсорбційну ємність щодо йонів Fe^{3+} у три рази вищу, порівняно з вихідним активованим вугіллем. Таке значне підвищення адсорбційної активності, на нашу думку, пояснюється кількома факторами. По-перше: збільшенням кількості поверхневих адсорбційних центрів, якими слугують функціональні групи, ідентифіковані методом Боєма. По-друге: підвищенням сили π -супряженої електронної системи за рахунок введення у вугільну матрицю додаткових електронів від атома нікелю, що створює умови для орієнтаційних та індукційних сил взаємодії з йонами феруму. І наприкінці: магнітні властивості, яких набуває вугільна поверхня внаслідок модифікування нікелем, сприяють збільшенню концентрації йонів Fe^{3+} у приповерхневому шарі адсорбенту.

Отримані експериментальні дані доводять високу ефективність синтезованого нікельовмісного адсорбенту для знезалізнєння і дають можливість рекомендувати його для очищення природних вод від заліза у наступній послідовності технологічних стадій: аера-

ція забрудненої води з наступним фільтруванням на механічному фільтрі; адсорбційне очищення води на модифікованому адсорбенті; пом'якшення води методом йонного обміну шляхом фільтрування води через комплексний матеріал Ecomix A.

Список використаних джерел

- [1] "Карта якості води WaterNet". [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://waternet.ua/quality_map.
- [2] Г. И. Николадзе, *Обезжелезивание природных и оборотных вод*. Москва, Россия: Стройиздат, 1978.
- [3] *Фізико-хімічні методи очищення води. Керування водними ресурсами* / під ред. І. М. Астреліна та Х. Ратнавіри. Київ, Україна: Друкарня Вольф, 2015.
- [4] Z. Maletskyi, T. Mitchenko, N. Makarova, and W. Hoell, "Properties of anion exchange resins exhausted by humic compounds", *Desalination and Water Treatment*, no. 25 (1-3), pp. 78-83, 2011. doi: 10.5004/dwt.2011.1524.
- [5] *Світ сучасної водопідготовки: серія видань* / за ред. Т. Є. Мітченко. Київ, Україна: BYBT Waternet, 2019.
- [6] I. Pandová, M. Rimár, A. Panda, J. Valíček, M. Kušnerová, and M. Harničárová, "A study of using natural sorbent to reduce iron cations from aqueous solutions", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, no. 17 (10), p. 3686, 2020. doi: 10.3390/ijerph17103686.
- [7] I. C. Ostroski, M. A. Barros, E. A. Silva, J. H. Dantas, P. A. Arroyo, and O. C. Lima, "The removal of Fe (III) ions by adsorption onto zeolite columns", *Adsorption Science*

- & Technology, no. 25 (10), pp. 757-768, 2007.
doi: 10.1260/026361707785284239.
- [8] E. Neag, A. I. Török, C. Tanaselia, I. Aschilean, and M. Senila, "Kinetics and equilibrium studies for the removal of Mn and Fe from binary metal solution systems using a Romanian thermally activated natural zeolite", *Water*, no. 12 (6), p. 1614, 2020.
doi: 10.3390/w12061614.
- [9] S. Lin, H. He, R. Zhang, and J. Li, "Removal of Fe (II) and Mn (II) from aqueous solution by palygorskite", in *Int. Conf. on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, 2011.
doi: 10.1109/cdciem.2011.341.
- [10] D. Barloková, and J. Ilavský, "Natural zeolites with a surface MnO₂ layer in water treatment", *Chem. Listy*, no. 108, pp. 1153-1157, 2014; C. Colella, "Natural zeolites. Studies in surface science and catalysis zeolites and ordered mesoporous materials", *Progress and Prospects*, pp. 13-40, 2005.
doi: 10.1016/s0167-2991(05)80004-7.
- [11] X. Liu, C. Wang, Q. Wu, and Z. Wang, "Metal-organic framework-templated synthesis of magnetic nanoporous carbon as an efficient absorbent for enrichment of phenylurea herbicides", *Analytica Chimica Acta*, no. 870, pp. 67-74, 2015.
doi: 10.1016/j.aca.2015.02.036.
- [12] H. Kim, R. Ko, S. Lee, and K. Chon, "Removal efficiencies of manganese and iron using pristine and phosphoric acid pretreated biochars made from banana peels", *Water*, no. 12 (4), p. 1173, 2020.
doi: 10.3390/w12041173.
- [13] A. Mashkuri, A. Saljoqi, and Z. Tohidian, "Nano clay Ni/NiO nanocomposite new sorbent for separation and preconcentration dibenzothiophene from crude prior to UV-vis spectrophotometry determination", *Analytical Chemistry Research*, no. 12, pp. 47-51, 2017.
doi: 10.1016/j.ancr.2017.02.002.
- [14] L. Lei, Z. Yao, J. Zhou, W. Zheng, B. Wei, J. Zu, and K. Yan, "Hydrangea-like Ni/NiO/C composites derived from metal-organic frameworks with superior microwave absorption", *Carbon*, no. 173, pp. 69-79, 2021.
doi: 10.1016/j.carbon.2020.10.093.
- [15] L. Hao, X. Meng, C. Wang, Q. Wu, and Z. Wang, "Preparation of nickel-doped nanoporous carbon microspheres from metal-organic framework as a recyclable magnetic adsorbent for phthalate esters", *Journal of Chromatography A*, no. 1605, p. 460364, 2019.
doi: 10.1016/j.chroma.2019.460364.
- [16] X. Liu, C. Wang, Q. Wu, and Z. Wang, "Metal-organic framework-templated synthesis of magnetic nanoporous carbon as an efficient absorbent for enrichment of phenylurea herbicides", *Analytica Chimica Acta*, no. 870, pp. 67-74, (2015).
doi: 10.1016/j.aca.2015.02.036/
- [17] D. Li, M. He, B. Chen, and B. Hu, "Metal organic frameworks-derived magnetic nanoporous carbon for preconcentration of organophosphorus pesticides from fruit samples followed by gas chromatography-flame photometric detection", *Journal of Chromatography A*, no. 1583, pp. 19-27, 2019.
doi: 10.1016/j.chroma.2018.11.012.
- [18] X. Wei, Y. Wang, J. Chen, F. Xu, Z. Liu, X. He, and Y. Zhou, "Adsorption of pharmaceuticals and personal care products by deep eutectic solvents-regulated magnetic metal-organic framework adsorbents: Performance and mechanism", *Chemical Engineering Journal*, no. 392, p. 124808, 2020.
doi: 10.1016/j.cej.2020.124808.
- [19] "Порошковый активированный уголь Norit SAE SUPER". [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ecofilter.com.ua/prod/ac/norit/sae_super_norit.htm.
- [20] H. P. Bohem, "Surface oxides on carbon and their analysis: a critical assessment", *Carbon*, no. 40, pp. 145-149, 2002.
- [21] "Фильтрующий материал Ecomix A 25 л". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ecosoft.ua/filtruyushchiy-material-ecomix-a-25-l/>.

References

- [1] "WaterNet water quality map". [Online]. Available: https://waternet.ua/quality_map.
- [2] G. I. Nikoladze, *Iron removal of natural and recycled waters*, Moscow, Russia: Stroyizdat, 1978 [in Russian].
- [3] *Physical-chemical methods of water purification. Managing water*, I. M. Astrelina and H. Ratnaviry, Eds. Kyiv, Ukraine: Drukarnia Volf, 2015 [in Ukrainian].

- [4] Z. Maletskyi, T. Mitchenko, N. Makarova, and W. Hoell, "Properties of anion exchange resins exhausted by humic compounds", *Desalination and Water Treatment*, no. 25 (1-3), pp. 78-83, 2011.
doi: 10.5004/dwt.2011.1524.
- [5] *The world of modern water treatment: a series of publ.*, T. E. Mitchenko, Ed. Kyiv, Ukraine: BYBT Waternet, 2019 [in Ukrainian].
- [6] I. Pandová, M. Rimár, A. Panda, J. Valíček, M. Kušnerová, and M. Harničárová, "A study of using natural sorbent to reduce iron cations from aqueous solutions", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, no. 17 (10), p. 3686, 2020.
doi: 10.3390/ijerph17103686.
- [7] I. C. Ostroski, M. A. Barros, E. A. Silva, J. H. Dantas, P. A. Arroyo, and O. C. Lima, "The removal of Fe (III) ions by adsorption onto zeolite columns", *Adsorption Science & Technology*, no. 25 (10), pp. 757-768, 2007.
doi: 10.1260/026361707785284239.
- [8] E. Neag, A. I. Török, C. Tanaselia, I. Aschilean, and M. Senila, "Kinetics and equilibrium studies for the removal of Mn and Fe from binary metal solution systems using a Romanian thermally activated natural zeolite", *Water*, no. 12 (6), p. 1614, 2020.
doi: 10.3390/w12061614.
- [9] S. Lin, H. He, R. Zhang, and J. Li, "Removal of Fe (II) and Mn (II) from aqueous solution by palygorskite", in *Int. Conf. on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, 2011.
doi: 10.1109/cdciem.2011.341.
- [10] D. Barloková, and J. Ilavský, "Natural zeolites with a surface MnO₂ layer in water treatment", *Chem. Listy*, no. 108, pp. 1153-1157, 2014; C. Colella, "Natural zeolites. Studies in surface science and catalysis zeolites and ordered mesoporous materials", *Progress and Prospects*, pp. 13-40, 2005.
doi: 10.1016/s0167-2991(05)80004-7.
- [11] X. Liu, C. Wang, Q. Wu, and Z. Wang, "Metal-organic framework-templated synthesis of magnetic nanoporous carbon as an efficient absorbent for enrichment of phenylurea herbicides", *Analytica Chimica Acta*, no. 870, pp. 67-74, 2015.
doi: 10.1016/j.aca.2015.02.036.
- [12] H. Kim, R. Ko, S. Lee, and K. Chon, "Removal efficiencies of manganese and iron using pristine and phosphoric acid pre-treated biochars made from banana peels", *Water*, no. 12 (4), p. 1173, 2020.
doi: 10.3390/w12041173.
- [13] A. Mashkuri, A. Saljooqi, and Z. Tohidian, "Nano clay Ni/NiO nanocomposite new sorbent for separation and preconcentration dibenzothiophene from crude prior to UV-vis spectrophotometry determination", *Analytical Chemistry Research*, no. 12, pp. 47-51, 2017.
doi: 10.1016/j.ancr.2017.02.002.
- [14] L. Lei, Z. Yao, J. Zhou, W. Zheng, B. Wei, J. Zu, and K. Yan, "Hydrangea-like Ni/NiO/C composites derived from metal-organic frameworks with superior microwave absorption", *Carbon*, no. 173, pp. 69-79, 2021.
doi: 10.1016/j.carbon.2020.10.093.
- [15] L. Hao, X. Meng, C. Wang, Q. Wu, and Z. Wang, "Preparation of nickel-doped nanoporous carbon microspheres from metal-organic framework as a recyclable magnetic adsorbent for phthalate esters", *Journal of Chromatography A*, no. 1605, p. 460364, 2019.
doi: 10.1016/j.chroma.2019.460364.
- [16] X. Liu, C. Wang, Q. Wu, and Z. Wang, "Metal-organic framework-templated synthesis of magnetic nanoporous carbon as an efficient absorbent for enrichment of phenylurea herbicides", *Analytica Chimica Acta*, no. 870, pp. 67-74, (2015).
doi: 10.1016/j.aca.2015.02.036/
- [17] D. Li, M. He, B. Chen, and B. Hu, "Metal organic frameworks-derived magnetic nanoporous carbon for preconcentration of organophosphorus pesticides from fruit samples followed by gas chromatography-flame photometric detection", *Journal of Chromatography A*, no. 1583, pp. 19-27, 2019.
doi: 10.1016/j.chroma.2018.11.012.
- [18] X. Wei, Y. Wang, J. Chen, F. Xu, Z. Liu, X. He, and Y. Zhou, "Adsorption of pharmaceuticals and personal care products by deep eutectic solvents-regulated magnetic metal-organic framework adsorbents: Performance and mechanism", *Chemical Engineering Journal*, no. 392, p. 124808, 2020.
doi: 10.1016/j.cej.2020.124808.
- [19] "Powdered activated carbon Norit SAE SUPER". [Online]. Available: http://ecofilter.com.ua/prod/ac/norit/sae_super_norit.htm [in Russian].

- [20] H. P. Bohem, "Surface oxides on carbon and their analysis: a critical assessment", *Carbon*, no. 40, pp. 145-149, 2002.
- [21] "Ecomix A filter media 25 l". [Online]. Available: <https://ecosoft.ua/filtruyushchiy-material-ecomix-a-25-l/> [in Russian].

V. G. Rudenko, master,
I. M. Ivanenko, Ph.D., associate professor,
I. V. Kosogina, Ph.D., associate professor,
 e-mail: kosoginairyna@gmail.com
A. P. Burmak, Ph.D.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
 Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

NEW EFFICIENT CARBON ADSORBENT FOR WATER DEIRONING

This paper aimed to synthesize a new adsorption material based on activated carbon and modified with Nickel, determine its characteristics, and study its effectiveness in the water deironing process. Nickel-containing samples of the adsorption material were obtained by impregnating oxidized activated carbon with Nickel (II) nitrate, followed by reduction of Nickel with hydrazine in an inert medium. A study of the phase composition and the nickel content's determination in the obtained modified sample was conducted which was 18,35%. With the method of low-temperature adsorption-desorption of nitrogen was established that the oxidized form of the original activated carbon (AB_{ox}) almost twice loses its inner surface and the total porosity decreases by 42%. The Boem method was used to characterize the samples' surface of the original activated carbon and its modified samples. The surface chemistry of the synthesized carbon adsorbent is multifunctional with a high anion and cation exchange capacity. The adsorption capacity of Ni-modified active carbon toward Fe^{3+} ions was three times higher in comparison to the original activated carbon Norit SAE SUPER. The increase in adsorption activity is explained by a magnification in the strength of the π -conjugate electron system due to the introduction of additional electrons from the Nickel atoms into the carbon matrix, which creates conditions for its orientation and induction interactions with iron ions. Modification of the surface of the carbon adsorbent with nickel led to the appearance of magnetic properties of the synthesized material, which increases the concentration of Fe^{3+} ions in the near-surface layer of the adsorbent. As a consequence of the surface modification with Nickel, the increase in the adsorption capacity of the material toward iron compounds from ~117,42 mg/g to ~750 mg/g for the modified carbon material, in comparison to the initial active carbon observes. The adsorption process on the obtained Ni-containing carbon adsorbent is adequately described by the Langmuir model. It is proposed to use the synthesized material in the technology of water purification with a high concentration of iron compounds in the following combination of stages: aeration, filtration with a mechanical filter, ion exchange on modern material Ecomix A. Under such conditions, the efficiency of water purification was 99.8% in laboratory conditions.

Keywords: activated carbon, modification, Ni-containing adsorbent, adsorption capacity, water purification, iron compounds.

УДК 536.24:531

[0000-0002-8342-3011] **О. О. Онищук**, к.т.н., доцент
e-mail: oksanaduda2013@gmail.com

Волинський національний університет імені Лесі Українки
Потапова, 9, м. Луцьк, 43000, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ШВИДКОСТІ ДЛЯ ТЕПЛООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ В АДІАБАТИЧНИХ УМОВАХ

У статті показано модель теплообміну для циліндричної заготовки з нестационарним режимом в адиабатичних умовах. Визначено середню швидкість поширення тривимірного фронту теплообміну вздовж циліндра та середню поперечну температуру для цього режиму через рівняння теплопровідності та рівняння кінетики. Крім того, визначено вплив радіуса циліндра на швидкість теплообміну. Використовуючи рівняння теплопровідності та граничні умови, визначено середню поперечну температуру циліндра при теплообміні. Також використовуючи рівняння кінетики, отримуємо значення середньої швидкості поширення тривимірного фронту вздовж циліндра для нестационарного режиму в адиабатичних умовах. Досліджено через параметр R_0 , який показує, наскільки радіус циліндра більший характеристичної величини зони реакції, що при збільшенні радіуса швидкість теплообміну незначно зменшується. Графічно показано залежність R_0 від характеристичної величини зони реакції G/T_d для двох режимів ступеня віддалення від області. Використовуючи рівняння теплопровідності та рівняння кінетики з початковими і граничними умовами, визначено середню швидкість поширення фронту вздовж циліндра для нестационарного режиму в адиабатичних умовах та середню поперечну температуру. Розв'язано осесиметричну граничну задачу нестационарного теплообміну з рухом фронту тепла уздовж осі симетрії циліндра. Приведена математична модель теплообмінного процесу досліджувалася із застосуванням методу кінцевих різниць і програмного забезпечення ANSYS. Показано, що температура глибини перетворення теплообміну знаходиться в перерізі, перпендикулярному осі циліндра, який проходить через точку з максимальною температурою, причому, чим вища температура, тим світліша штриховка області.

Ключові слова: теплообмін, циліндрична заготовка, математична модель, температура, теплові процеси, метод кінцевих різниць, ANSYS.

Вступ. Теплообмінні процеси як хіміко-технологічний прийом дають можливість одержувати цільові продукти при великій продуктивності процесу і низькій вартості витрат на його організацію [1, 2]. В теплових процесах беруть участь не менш як два середовища з різними температурами. Середовище з більш високою температурою, яке віддає при теплообміні тепло, називається теплоносієм, середовище з більш низькою температурою – холодильним агентом (холодоагентом). Теплообмін має важливе значення для проведення процесів випаровування, сушіння, перегонки й ін. Є три способи передачі теплоти: теплопровідність, конвекція і випромінювання. Теплопровідність – явище перенесення теплової енергії безпосереднім контактом між частинками тіла [3, 9].

Математичне моделювання теплообмінних процесів, що базується на їх математичному описі, досить давно використовується

в техніці [8, 9, 11, 12]. Проте зміст математичного моделювання, його можливості та актуальність створення математичних моделей зазнали докорінних змін. Це пов'язано з перевагами цих методів перед натуральним експериментом, зі швидким розвитком засобів обчислювальної техніки та її математичного забезпечення і з удосконаленням наявних та розробкою нових чисельних методів реалізації складних математичних моделей, що використовують математичний апарат диференціального й інтегрального числення [9]. Сучасні математичні моделі дають змогу одержати розрахунковим шляхом велику і досить точну інформацію про різні теплові процеси в техніці. Проведення обчислювальних експериментів з математичною моделлю, що реалізована у вигляді комп'ютерної програми, забезпечує скорочення термінів дослідження і зменшення його вартості, дає можливість прогнозувати поведінку досліджуваного об'єкта в різних,

у тому числі й екстремальних ситуаціях, створюючи, таким чином, основу для теплотехнічного обґрунтування проектних рішень при розробці нових і вдосконаленні наявних технологічних процесів з метою зниження енергоємності виробництва і підвищення якості продукції [10-15].

Мета та постановка задачі. Оскільки на теплообмін впливає одночасно декілька факторів: швидкість, напрямок, розміри моделі, початкова температура, температура середовища та умови, в яких відбувається безпосередньо сам процес, тому важливо дослідити ці фактори.

Виклад основного матеріалу. Поширення тепла починалося локально у точці. Надалі процес проходить у режимі пошарового поетапного руху. У відомих роботах з вивчення теплового режиму теплообмінних процесів розглядалася подібна осесиметрична задача нестационарного теплообміну з рухом уздовж осі симетрії циліндричної системи на початковому етапі [6, 11].

Оскільки після початку поширення тепла відбувається ініціювання реакції, теплообмін здійснюється і на бічній поверхні, і фронт тепла рухається перпендикулярно до осі симетрії.

Параметри теплового режиму і розмірність розв'язуваної задачі залежать від координат початкової точки теплообмінного процесу. Оскільки в нашому випадку можливий початок руху тепла з центру торця або ж з бічної поверхні циліндра, то протягом усього часу теплообміну реалізується осесиметричний теплообмін.

У ролі основного об'єкта дослідження розглядається теплообмінний процес у циліндрі. Таким чином, осесиметричним має бути і температурне поле циліндра.

Розглядаємо двовимірну модель теплообміну при теплообміні плоского шару однієї товщини циліндра. Шар вирізається таким чином, щоб його довжина дорівнювала максимально можливому шляху теплообміну. Відповідно площини перерізу проходять через початкову точку поширення і найбільш віддалену від неї точку.

Така модель дає змогу описати поле температур у найбільш холодній (початок теплообміну) і гарячій (закінчення теплообміну) зонах циліндра (рисунок 1).

З математичної точки зору, процес теплообміну описується системою рівнянь тепло- і масопереносу з джерелами тепла і продуктів, обумовленого хімічною реакцією [6, 7]. Наявність членів, експоненціально залежних від температури, визначає всі специфічні риси, властиві теплообмінним процесам.

Рішення цієї системи рівнянь виражає просторово-часовий розподіл температур, концентрації реагентів і продуктів, швидкостей реакції та інших показників процесу [8, 9, 11].

Реакція теплообміну проходить одночасно в усьому об'ємі тіла. Тепло, що виділяється, частково відводиться в навколишнє середовище, а частково залишається в системі і підвищує її температуру. Температура змінюється від початкового значення до деякої величини, що відповідає повному адіабатичному перетворенню реагентів.

Ця модель дає можливість описати механізм руху теплообміну для нестационарного режиму горіння в адіабатичних умовах та визначити середню швидкість поширення теплообміну в спіновому режимі. Крім того, використовуючи основні кінетичні рівняння теплообміну, визначимо вплив радіуса на швидкість горіння (рисунок 1).

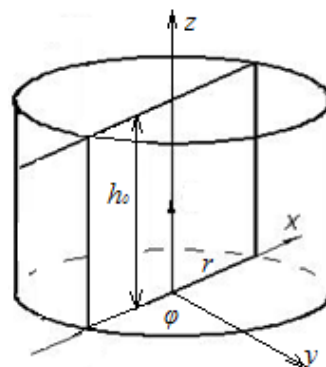


Рисунок 1 – Схематична модель руху теплообміну в циліндричній заготовці

Результати досліджень. В безрозмірному вигляді математична модель руху теплообміну включає рівняння теплопровідності [12-14]

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{1}{x^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{1}{Td} \frac{\partial \eta}{\partial \tau} \quad (1)$$

і рівняння кінетики [11, 13]

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} = \begin{cases} Td(1-\eta) \exp \frac{\theta}{1+Ar\theta} n \mu \eta & \eta < 1, \\ 0 & \text{при } \eta \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

Система рівнянь має початкові і граничні умови [10]:

$$\begin{aligned} \tau = 0, 0 \leq x \leq R_0, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, 0 \leq z \leq z_0 : \theta = \theta_0, \eta = 0; \\ \tau > 0, x = R_0, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, 0 \leq z \leq z_0 : \frac{\partial \theta}{\partial x} = -\alpha_T (\theta - \theta_0); \\ \tau > 0, 0 \leq x \leq R_0, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, z = 0 : \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\tau > 0, 0 \leq x \leq R_0, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, z = z_0 : \begin{cases} \theta = 0 \text{ при } \tau \leq \tau_{ign} \\ \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \text{ при } \tau < \tau_{ign} \end{cases}$$

$$\theta = \frac{(T - T_*)E}{RT_*^2}, t_* = \frac{cRT_*^2}{k_0EQ} \exp \frac{E}{RT_*}, \tau = \frac{t}{t_*}, \tau_{ign} = \frac{t_{ign}}{t_*}. \quad (4)$$

$$h_*^2 = \frac{\lambda t^*}{c\rho_0}, x = \frac{r}{h_*}, z = \frac{h}{h_*}, R_0 = \frac{r_0}{h_*}, z_0 = \frac{h_0}{h_*}, Ar = \frac{RT_*}{E};$$

$$Td = \frac{cRT_*^2}{EQ}, \theta_0 = -\frac{1}{Td}, \alpha_T = \frac{\alpha_t h_*}{\lambda}, T_* = T_0 + Q/c, \quad (5)$$

де T – температура, T_* – характеристична температура, яку приймають за адіабатичну температуру теплообміну, T_0 – температура навколишнього середовища і початкова температура зразка, C – питома теплоємність, Q – тепловий ефект реакції, η – глибина перетворення, ρ_0 – маса конденсованої фази в одиниці об'єму, t – час, r, φ, h – просторові координати: радіус, кут і координата вздовж осі циліндра відповідно, λ – теплопровідність, K_0 – пе-

редекспотенціальний множник, E – енергія активації, R – універсальна стала, α_T – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні зразка в навколишнє середовище, r_0, h_0 – радіус і висота циліндра, t_{ign} – час дії запалюючого імпульсу, T_d – критерій Тодеса, Ar – критерій Арреніуса.

Математична модель теплообміну [11]:

1) систему трьох диференціальних рівнянь нестационарної теплопровідності в декартових координатах:

$$C_i \rho_i \frac{\partial T_i(x, y, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i(x, y, t)}{\partial y} \right); \quad (6)$$

2) граничні умови:

на границі фаз ($x = 0, y = h_1$) умови I роду

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial T_1(0, y, t)}{\partial x} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2(0, y, t)}{\partial x}; T_1(0, y, t) = T_2(0, y, t); \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1(x, h_1, t)}{\partial y} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2(x, h_1, t)}{\partial y}; T_1(x, h_1, t) = T_2(x, h_1, t); \end{aligned} \right\}; \quad (7)$$

3) початкові умови:

$$T_1(0, y_1, 0) = T_r; T_2(x, y, 0) = T_0; \quad (8)$$

4) рівняння руху фронту тепла:

$$x_r = s_r \cdot t;$$

5) температура рухомої границі I роду (фронт горіння) при $h_1 = y_1$:

$$T(x_r, y_1, t) = T_r; \quad (9)$$

6) умови симетрії температурного поля відносно осі x :

$$\frac{\partial T_1(x, 0, t)}{\partial y} = 0; \quad (10)$$

7) умови адіабатичності перед фронтом тепла ($x = x_r + 0$):

$$\frac{\partial T_1(x_r + 0, y_1, t)}{\partial x} = 0. \quad (11)$$

При розрахунку температурного поля процесу теплообміну всього шару системи рівнянь (1)–(11) виключаються рівняння (8)–

(9) і додаються граничні умови першого роду на торцевій поверхні шару при $x = l$:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \alpha_0 \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial t};$$

$$T_1(h, y, t) = T_2(h, y, t). \quad (12)$$

У (6)–(10) позначено: T_i – температура процесу теплообміну, T_1, T_2 – температура на початку процесу та в кінці відповідно; C_i, ρ_i, λ_i – питома теплоємність, густина і коефіцієнт теплопровідності; h_i – характерні розміри зразка; i – індекс системи: t – час; x_r – текуча координата процесу теплообміну; α_r – коефіцієнт тепловіддачі; T_∞, T_0 – температура тіла та середовища відповідно; s_r – швидкість теплообміну.

Визначаємо початкову температуру через прогнозування основної температури, яка базується на основі моделі напівбезмежного тіла. Використовуємо замість рівняння теплопровідності (1) спрощене одновимірне рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \alpha_0 \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial t} \quad (13)$$

де α_0 – коефіцієнт тепловіддачі.

Інтенсивність теплового потоку або питомий тепловий потік q (густина теплового потоку) – це потужність теплової іскри, поділена на площу поверхні фронту зразка, тобто кількість теплоти, яка проходить 1 м² площі поверхні за одиницю часу.

Використовуючи початковий час ініціювання та початкову температуру, розраховують тепловий потік.

Тепловий потік пропорційний градієнту температури (закон Фур'є) [11]:

$$q = -\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}. \quad (14)$$

Початкові умови:

$$0 < x < \infty, t > 0, T(x, 0) = T_i. \quad (15)$$

Крайові умови:

$$-\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = \alpha_0 \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_0 \quad (16)$$

Скористаємося перетворенням Лапласа.

Трансформанту позначимо тильдою « $\tilde{T}$ »:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \rightarrow \tilde{T}(x, s) - T(x, 0),$$

оскільки

$$T(x, 0) = T_i, \text{ то}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \rightarrow \tilde{T}(x, s) - T_i,$$

$$\text{тоді} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \rightarrow \frac{\partial^2 \tilde{T}(x, s)}{\partial x^2},$$

де x – текуча координата фронту горіння; α_r – коефіцієнт тепловіддачі, s – швидкість поширення фронту горіння, T_i – температура ініціювання.

Таким чином, отримуємо $T(x, t) \rightarrow$ рівняння в трансформантах:

$$\frac{\partial^2 T(x, s)}{\partial x^2} - \frac{s \tilde{T}(x, s)}{\alpha_0} = \frac{T_i}{\alpha_0} \quad (17)$$

Характеристичне рівняння:

$$x^2 - \frac{s}{\alpha_0} = 0, x = \pm \sqrt{\frac{s}{\alpha_0}} \quad (18)$$

Частинний розв'язок:

$$-\frac{s}{\alpha_0} A = -\frac{T_i}{\alpha_0} \rightarrow A = \frac{T_i}{s}, T_r = \frac{T_i}{s} \quad (19)$$

Повний розв'язок:

$$T = C_1 e^{-\sqrt{\frac{s}{\alpha_0}} x} + C_2 e^{\sqrt{\frac{s}{\alpha_0}} x} + \frac{T_i}{s} \quad (20)$$

З умови обмеженості $\tilde{T}$ при $x \rightarrow \infty$ випливає, що $C_2 = 0$. Крайова умова в трансформантах має вигляд:

$$\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \Big|_{x=0} = -\frac{q_0}{\lambda \cdot s} \quad (21)$$

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\left(\tilde{N}_1 e^{-\sqrt{\frac{s}{\alpha_0}} x} \right) \Big|_{x=0} = -C_1 \sqrt{\frac{s}{\alpha_0}} \rightarrow$$

$$C_1 = \frac{q_0 \sqrt{\alpha_0}}{\lambda \cdot s^{\frac{3}{2}}}$$

$$Q = \frac{q_0 \sqrt{\alpha_0}}{\lambda \cdot s^{\frac{3}{2}}} e^{-\sqrt{\frac{s}{\alpha_0}} x} + \frac{T_i}{s} \quad (22)$$

Отже, початкова температура:

$$T(x, t) = T_i + \frac{q_0}{\lambda \sqrt{\pi}} \left(-\frac{e^{2\lambda \frac{x^2}{2\sqrt{\alpha_0 t}}}}{\pi x} \right) +$$

$$2\sqrt{\alpha_0 t} e^{-\frac{x^2}{4\alpha_0 t}} \quad (23)$$

Вважаючи сталою інтенсивність теплового потоку q''_0 та припускаючи, що початкова температура T_i – стала ($T_i = \text{const}$), розподіл температури можна виразити так:

$$T(x, t) - T_i = \frac{\frac{2q''_0(\alpha_0 t)}{\pi}}{\lambda} \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha_0 t}\right) -$$

$$\frac{q''_0 x}{\lambda} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_0 t}}\right) \quad (24)$$

Таким чином, розглянуто осесиметричну граничну задачу нестационарного теплообміну двовимірної моделі на стадії синтезу з рухом теплообміну уздовж осі симетрії циліндричного зразка.

Обговорення результатів. Приведена математична модель процесу досліджувалась чисельно із застосуванням методу кінцевих різниць та програмного забезпечення ANSYS [14, 15].

Таким чином, на рисунку 2 зображено тривимірну модель теплообміну у циліндрі в нестационарному режимі [5].

Використовуючи розрахункову просторову сітку, яка є нерівномірною, з нефіксованою кількістю вузлів, забезпечувалось згущення вузлів сітки в області фронту і у міру зміні температури зразка відбувалось нарощування зразка з боку реагентів і відсікання віддаленої від фронту частини продуктів. Сітка використана через наскрізний перетин по діаметру.

Температура глибини перетворення теплообміну знаходиться в перерізі, перпендикулярному осі циліндра, який проходить через точку з максимальною температурою, причому, чим вища температура, тим світліша штриховка області.

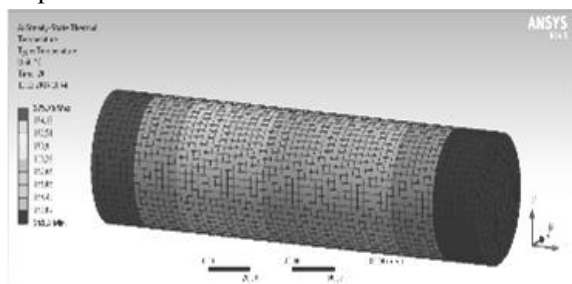


Рисунок 2 – Теплообмінний режим для циліндричної заготовки з нестационарним режимом в адіабатичних умовах
 $A_r = 0,0529$, $T_d = 0,1087$, $a_{st} \approx 0,86$ $R_0 \approx 58$

Використовуючи рівняння теплопровідності (1), а також граничні умови (3), визначено середню поперечну температуру циліндра при теплообміні:

$$\bar{\theta}(z, t) = \frac{1}{\pi R_0^2} \int_0^{R_0} \int_0^{2\pi} \theta(x, \varphi, z, t) d\varphi dr. \quad (25)$$

Використовуючи рівняння теплопровідності (1) та рівняння кінетики (2), отримуємо значення середньої швидкості поширення тривимірного фронту вздовж циліндра для нестационарного режиму в адіабатичних умовах

$$\bar{u} = \frac{1}{\pi R_0^2 (\tau_k - \tau_0)} \iiint_V \eta(x, \varphi, z, \tau_k) dV - \iiint_V \eta(x, \varphi, z, \tau_0) dV, \quad (26)$$

де τ_k, τ_0 – час початку і кінця процесу на певному періоді розрахунку, V – об'єм циліндра.

Як параметри використовували a_{st} і R_0 . Параметр a_{st} , визначений у роботі, характеризує ступінь віддалення від області, в якій плоский стаціонарний фронт є нестійким.

$$a_{st} = 9,1 T_d - 2,5 A_r < 1. \quad (27)$$

Границя, що розділяє стійкі і нестійкі одномірні режими, визначається умовою $a_{st} = 1$.

Параметр R_0 показує, наскільки радіус циліндра більший характеристичної величини зони реакції.

На рисунку 3 зображено залежність R_0 від характеристичної величини зони реакції G/T_d для двох режимів ступеня віддалення від області a_{st} , де видно, що ступінь віддалення від області $a_{st} = 1$ більший при більших значеннях R_0 .

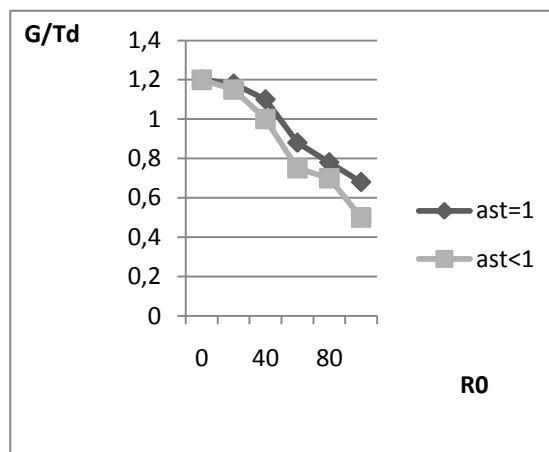


Рисунок 3 – Залежність радіуса R_0 від характеристичної величини зони реакції G/T_d

Висновки. Таким чином, описано механізм теплообмінного руху для нестационарного режиму в адіабатичних умовах.

Використовуючи рівняння теплопровідності та рівняння кінетики з початковими і граничними умовами, визначено середню швидкість поширення фронту вздовж циліндра для нестационарного режиму в адіабатичних умовах та середню поперечну температуру.

Розв'язано осесиметричну граничну задачу нестационарного теплообміну з рухом фронту тепла уздовж осі симетрії циліндра.

Досліджено, що при більшому радіусі швидкість теплообміну незначно зменшується.

Отже, використання процесу їх теплообміну у хімічній технології приводить до висновку про те, що нині вони мають значні перспективи.

Список використаних джерел

- [1] Я. Б. Зельдович, и Д. А. Франк-Каменецкий, "Теория теплового распространения пламени", *Журнал физической химии*, т. 12, № 1, с. 100-105, 1938.
- [2] Д. А. Франк-Каменецкий, "Распределение температур в реакционном сосуде и стационарная теория теплового взрыва", *Журнал физической химии*, т. 13, № 6, с. 738-755, 1939.
- [3] А. Г. Касаткин, *Основные процессы и аппараты химической технологии*. Москва, Россия: Химия, 1974.
- [4] А. Н. Плановский, и П. И. Николаев, *Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии*. Москва, Россия: Химия, 1972.
- [5] А. П. Врагов, *Гідромеханічні процеси та обладнання хімічних і нафтохімічних виробництв*: навч. посіб. Суми: Вид-во Сум. держ. ун-ту, 2001.
- [6] В. Н. Стабников, В. М. Лысянский, и В. Д. Попов, *Процессы и аппараты пищевых производств*. Москва, Россия: Агропромиздат, 1985.
- [7] Н. И. Гельперин, *Основные процессы и аппараты химической технологии*. Москва, Россия: Химия, 1981.
- [8] В. М. Чесунов, и А. А. Захарова, *Основные химико-технологические процессы и аппараты в производстве легкой промышленности*: учебник для вузов. Москва, Россия: Легпромбытиздат, 1989.
- [9] О. Флореа, и О. Смигельский, *Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии*: пер. с рум. / под ред. С. З. Кагана. Москва, Россия: Химия, 1971.
- [10] В. С. Бодров, А. Т. Богориш, П. Т. Лобода, и В. М. Лысянский, *Проектирование процессов и аппаратов пищевых производств* / под ред. В. Н. Стабникова. Киев, Украина: Вища школа, 1982.
- [11] *Основные процессы и аппараты химической технологии*: пособие по проектированию / под ред. Ю. И. Дытнерского. Москва, Россия: Химия, 1983.
- [12] *Расчеты химико-технологических процессов* / под общ. ред. И. П. Мухленова. Ленинград, Россия: Химия, 1976.
- [13] В. М. Лекае, и А. К. Лекае, *Процессы и аппараты химической промышленности*. Москва, Россия: Высшая школа, 1984.
- [14] *Справочник химика*. Ленинград, Россия: Химия, 1968. Т. IV.
- [15] В. А. Бруйка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова, Н. А. Глазунова, и И. Е. Адеянов, *Инженерный анализ в ANSYS Workbench*: учеб. пособ. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010.

References

- [1] Ya. B. Zel'dovich, and D. A. Frank-Kamenetskiy, "Theory of thermal propagation of flame", *Zhurnal fizicheskoy khimii*, vol. 12, no. 1, pp. 100-105, 1938 [in Russian].
- [2] D. A. Frank-Kamenetskiy, "Temperature distribution in a reaction vessel and the stationary theory of thermal explosion", *Zhurnal fizicheskoy khimii*, vol. 13, no. 6, pp. 738-755, 1939 [in Russian].
- [3] A. G. Kasatkin, *Basic processes and devices of chemical technology*. Moscow, Russia: Khimiya, 1974. [in Russian].
- [4] A. N. Planovsky, and P. I. Nikolaev, *Processes and devices of chemical and petrochemical technology*. Moscow, Russia: Khimiya, 1972. [in Russian].
- [5] A. P. Vragov, *Hydromechanical processes and equipment of chemical and petrochemical productions*: textbook. Sumy: Vyd-vo Sum. derzh. un-tu, 2001 [in Ukrainian].
- [6] V. N. Stabnikov, V. M. Lysyansky, and V. D. Popov, *Processes and apparatus for food production*. Moscow, Russia: Agropromizdat, 1985 [in Russian].
- [7] N. I. Gelperin, *Basic processes and devices of chemical technology*. Moscow, Russia: Khimiya, 1981 [in Russian].
- [8] V. M. Chesunov, and A. A. Zakharova, *The main chemico-technological processes and devices in the production of light industry*: manual for universities. Moscow, Russia: Legprombytizdat, 1989 [in Russian].
- [9] O. Florea, and O. Smigelsky, *Calculations on processes and apparatuses of chemical technology*: transl. from Rom., S. Z. Kagan, Ed. Moscow, Russia: Khimiya, 1971 [in Russian].
- [10] V. S. Bodrov, A. T. Bogorish, P. T. Loboda, and V. M. Lysyansky, *Design of processes and apparatus for food production*, V. N. Stabnikov, Ed. Kiev, Ukraine: Vishcha shkola. 1982 [in Russian].
- [11] *Basic processes and devices of chemical technology*: design manual, Yu. I. Dyt-

- nersky, Ed. Moscow, Russia: Khimiya, 1983 [in Russian].
- [12] *Calculations of chemical-technological processes*, I. P. Mukhlenov, Ed. Leningrad, Russia: Khimiya, 1976 [in Russian].
- [13] V. M. Lekae, and A. K. Lekae, *Processes and apparatus of chemical industry*. Moscow, Russia: Vysshaya shkola, 1984 [in Russian].
- [14] *Handbook of a chemist*. Leningrad, Russia: Khimiya, 1968, vol. IV [in Russian].
- [15] V. A. Bruyaka, V. G. Fokin, E. A. Soldusova, N. A. Glazunova, and I. E. Adeyanov, *Engineering analysis in ANSYS Workbench: textbook*. Samara: Samar. gos. techn. un-t, 2010 [in Russian].

O. O. Onyschuk, Ph.D., associate professor
e-mail: oksanaduda2013@gmail.com
Lesya Ukrainka Volyn National University
Potapova, 9, Lutsk, 43000, Ukraine

OPTIMIZATION OF TEMPERATURE AND SPEED CALCULATION FOR HEAT EXCHANGE PROCESSES IN ADIABATIC CONDITIONS

The article shows a model of heat exchange for a cylindrical workpiece with a non-stationary regime in adiabatic conditions. The average velocity of propagation of three-dimensional heat exchange front along the cylinder and the average transverse temperature for this mode are determined through the equations of thermal conductivity and the equation of kinetics. In addition, the influence of the cylinder radius on the heat transfer rate is determined. It has been shown that the average transverse temperature of the cylinder during heat transfer is determined using the equations of thermal conductivity and boundary conditions. Also using the equation of kinetics, we obtain the value of the average velocity of propagation of the three-dimensional front along the cylinder for nonstationary mode in adiabatic conditions. It is investigated through the R_0 parameter, which shows how much the radius of the cylinder is larger than the characteristic value of the reaction zone, that with increasing the radius, the heat transfer rate decreases slightly. The dependence of R_0 on the characteristic value of the reaction zone G / T_d for two modes of the degree of distance from the region is graphically shown. Using the equations of thermal conductivity and the equations of kinetics with initial and boundary conditions, the average velocity of propagation of the front along the cylinder for the non-stationary regime in adiabatic conditions and the average transverse temperature are determined.

The axisymmetric boundary value problem of nonstationary heat exchange with the motion of the heat front along the axis of symmetry of the cylinder is solved. The given mathematical model of heat exchange process has been investigated using the finite difference method and ANSYS software. It is shown that the temperature of the heat transfer transformation depth is in the section, perpendicular to the axis of the cylinder, which passes through the point with the maximum temperature, and the higher the temperature, the lighter the shading of the area.

Keywords: heat transfer, cylindrical workpiece, mathematical model, temperature, thermal processes, finite difference method, ANSYS.

А. С. Чернова¹, магістрант,
[0000-0002-5027-6916] В. С. Гевод¹, д.х.н., доцент
e-mail: aquilegya@ua.fm

А. У. Ісаєва², д.б.н., професор, директор НДІ екології та біології

¹Український Державний хіміко-технологічний університет
просп. Гагаріна, 8, м. Дніпро, 49005, Україна

²НДІ екології та біології Шимкентського університету
просп. Таухе хана, 5, м. Шимкент, 160012, Казахстан

ПОРІВНЯННЯ ПРЯМОТОЧНОЇ І ВИТІСНЮВАЛЬНОЇ БІОФІЛЬТРАЦІЇ В ПРИСТРОЯХ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ОЧИЩЕННЯ ВОДИ

Денітрифікація питної води досліджена методами прямої та витіснювальної біофільтрації в спеціально розроблених малогабаритних фільтруючих пристроях, призначених для систем децентралізованої водопідготовки. Показано, що заміна прямої режиму біофільтрації денітрифікацією на витіснювальний має суттєві переваги. Зникає необхідність використовувати периферійне обладнання для підтримки безперервного, повільного потоку води крізь біофільтр. Споживач отримує можливість періодично подавати великі порції води в біофільтр і синхронно отримувати таку ж кількість денітрифікованої води. Ефект досягається шляхом оптимізації конструкції пристрою та структури фільтруючого простору. Конструкція створених біофільтрів проста, для їх складання можуть використовуватися матеріали з мінімальним «вуглецевим відбитком».

Ключові слова: денітрифікація, біологічний реактор, витіснювальна фільтрація, екологічність, економічність.

Вступ. Нітроген належить до групи біогенних елементів, природний біогеохімічний цикл якого нині порушений інтенсивним застосуванням його сполук у низці галузей промисловості, сільського господарства, викидом у довкілля недостатньо очищених стічних вод різного походження. Це призводить до появи й накопичення у водах, переважно підземних, розчинних сполук нітрогену, зокрема нітратів. Така тенденція спостерігається в багатьох країнах світу [1].

Нітрати відносяться до 3-го класу небезпечних речовин, мають здатність накопичуватися в тканинах організму людини, провокувати розвиток онкологічних захворювань, автоімунних реакцій. Велику небезпеку високі концентрації солей нітрогену становлять для дитячого організму [2]. Саме тому вміст нітратів у питній воді нормується. Їхня концентрація не повинна перевищувати 50 мг/дм³ [3, 4].

За даними [5], централізованим водопостачанням забезпечено лише четверту частину сіл України. Решта сільського населення споживає воду з колодязів та індивідуальних свердловин. Питомі ваги досліджених моні-

торингом у 2018 р. проб питної води з джерел децентралізованого водопостачання, які не відповідали вимогам, становила 34,4 %.

Питомі ваги проб питної води на вміст нітратів, що не відповідали нормативам, становила від 10,9 % до 40,2 % залежно від типу джерела води.

Існує ряд методів очищення води від нітратів, однак найбільш поширеними є іонний обмін, зворотний осмос, хімічне відновлення та біологічна денітрифікація [1, 2]. Перші два методи ефективно видаляють нітрати з води, але їх застосування при децентралізованому очищенні стримується:

- *зворотний осмос*: високою вартістю обладнання та витратних матеріалів; необхідністю попереднього вилучення з води, що очищується, механічних домішок і солей жорсткості; вилученням не тільки шкідливих домішок, а й корисних солей і мінералів, через що питна вода втрачає свою біологічну цінність;

- *іонний обмін*: низьким показником гідрофільності іонообмінної смоли; високими витратами на її відновлення і необхідністю утилізації при виробленні ресурсу; також не-

обхідністю встановлення автоматизованої системи для визначення часу задля регенерації або ж його точного прорахунку, щоб смола не втратила фільтраційну здатність.

Мета роботи – експериментальна оцінка ефективності децентралізованого очищення нітратвмісної води методом витіснювальної біофільтрації. Ідея полягала в тому, що при певній структурі фільтрувального шару та конструкції біофільтра доцільна зміна режиму його роботи з постійного потоку на періодичну (витіснювальну) біофільтрацію.

Застосування дискретної (залпом) подачі води на біофільтрацію дає змогу, на відміну від безперервного потоку, суттєво зменшити засмічення (кольматацію) [2] біофільтра. Як результат, необхідний ступінь денітрифікації води отримується на біофільтрі, що стабільно функціонує без використання спеціальних дозувальних і промивних приладів.

Теоретична частина. Біофільтри з нерухомим фільтраційним завантаженням при співвідношенні їх висоти до поперекового перерізу більш ніж у 20 разів можна розглядати як реактори ідеального витіснення. У них відбувається «поршнева» течія рідини, що фільтрується, без перемішування уздовж потоку при рівномірному розподілі концентрації речовин в напрямку, перпендикулярному потоку.

Математичною моделлю роботи реактора ідеального витіснення є рівняння

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = -u \frac{\partial C_i}{\partial l}, \quad (1)$$

де C_i – концентрація i -ї речовини в просторі біофільтра, τ – час, u – лінійна швидкість фільтрації; l – координата (довжина апарату).

Рівняння (1) враховує зміну концентрацій речовин у фільтрованому потоці в часі та просторі й у першому наближенні описує процеси, що відбуваються в апаратах з відношенням їхньої довжини до діаметра (l/d) > 20. Якщо в (1) замість лінійної швидкості фільтрації (u) використовувати об'ємну витрату v ($u = v/S$), то отримуємо

$$S \frac{\partial C_i}{\partial \tau} = -v \frac{\partial C_i}{\partial l}, \quad (2)$$

де S – перетин зони ідеального витіснення.

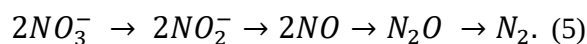
Якщо в (1) і (2) врахувати джерела зміни концентрацій речовин внаслідок перебігу хімічних або біохімічних реакцій (W_i), отримуємо рівняння матеріального балансу

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = -u \frac{\partial C_i}{\partial l} \pm W_i; \quad (3)$$

$$S \frac{\partial C_i}{\partial \tau} = -v \frac{\partial C_i}{\partial l} \pm W_i, \quad (4)$$

де C_i – концентрація i -ї речовини у фільтраційному потоці; W_i – швидкість хімічної або біохімічної реакції за i -ю речовиною.

Реакція мікробіологічної денітрифікації є багатостадійною:



Її перебіг забезпечується роботою складного ланцюга узгоджених ферментних комплексів у бактеріальних клітинах.

Для опису процесу мікробіологічної денітрифікації використовуються кінетичні рівняння Моно, що застосовуються як до донорів електронів, так і до акцепторів електронів, пов'язаних із ростом біомаси [6, 7].

Для детального аналізу процесу денітрифікації всередині біофільтра варто інтегрувати (3) або (4) з огляду на кінетичні моделі Моно.

Кінетика біоденітрифікації в цілому взаємопов'язана зі стадією існування біомаси (фази: латентна, експоненціального зростання, стаціонарна або розпад) та доступністю поживних речовин. Якщо біомаса виконує свої функції на стадії експоненціального зростання, а концентрація субстрату набагато нижча за константу насичення, кінетика по моделі Моно відповідає реакції першого порядку щодо субстрату. Коли біомаса знаходиться у стаціонарній фазі та відсутні обмеження поживних речовин, кінетика Моно переходить у нульовий порядок, оскільки концентрація субстрату в цьому стані набагато вища, ніж константа насичення [8, 9]. В разі, коли цикл процесу обмежений концентрацією біомаси й субстрату, кінетика відповідає реакції другого порядку. Оскільки денітрифікуючі бактерії виконують свої функції як на поверхні, так і всередині речовини біоплівки, хід процесу залежить від кількості біомаси та концентрації субстрату.

При первинному аналізі швидкості зниження концентрації нітратів можна розглядати як реакцію « n »-ного порядку, використовуючи такий вираз:

$$W_{NO_3^-} = -k(C_{NO_3^-})^n, \quad (6)$$

де k – константа швидкості біофільтрації по нітрат-іонах.

Варто відзначити, що « n » може змінюватися відповідно до умов біофільтрації, що, своєю чергою, ініціює перерозподіл концентрації біомаси та субстрату по довжині апарата (біофільтра), *тобто по шляху біофільтрації*. Як наслідок, при різному віці (стані) біоплівки на структурних одиницях (зернах) фільтраційного шару, різних схемах завантаження субстратів до біофільтра порядок реакції перетворення нітратів на газоподібний нітроген буде різним. Таким чином, динаміку біофільтрації доцільно аналізувати за допомогою рівняння

$$\frac{\partial C_{NO_3^-}}{\partial \tau} = -u \frac{\partial C_{NO_3^-}}{\partial l} - k(C_{NO_3^-})^n. \quad (7)$$

При стаціонарному режимі біофільтрація з постійною швидкістю потоку (u) води крізь біофільтр описується рівняннями:

$$\frac{\partial C_{NO_3^-}}{\partial \tau} = 0, \quad (8)$$

$$u \frac{\partial C_{NO_3^-}}{\partial l} = -k(C_{NO_3^-})^n \quad (9)$$

або

$$\frac{\partial C_{NO_3^-}}{(C_{NO_3^-})^n} = -\frac{k}{u} \partial l. \quad (10)$$

Вставивши в (10) значення $n = 0$, $n = 1$, $n = 2$, що означає відповідно нульовий, перший і другий порядки реакцій відновлення нітратів, й інтегруючи його в межах C від $C_{in.NO_3^-}$ до $C_{out.NO_3^-}$, та l від нуля до l , отримуємо:

$$C_{out.NO_3^-} = C_{in.NO_3^-} - k_0 \frac{l}{u}, \quad (11)$$

$$C_{out.NO_3^-} = C_{in.NO_3^-} * \exp\left(-k_1 \frac{l}{u}\right), \quad (12)$$

$$C_{out.NO_3^-} = \frac{1}{k_2 \frac{l}{u} + \frac{1}{C_{in.NO_3^-}}}. \quad (13)$$

Якщо замість рівномірного потоку води, що очищується від нітратів, в біофільтрі застосовується непроточний режим денітрифікації ($u = 0$), то:

$$-u \frac{\partial C_{NO_3^-}}{\partial l} = 0, \quad (14)$$

$$i \quad \frac{\partial C_{NO_3^-}}{\partial \tau} = -k(C_{NO_3^-})^n, \quad (15)$$

$$\text{або} \quad \frac{\partial C_{NO_3^-}}{(C_{NO_3^-})^n} = -k \partial \tau. \quad (16)$$

Інтегрування (16) з $n = 0$, $n = 1$, $n = 2$ в межах C від $C_{(\tau=0)NO_3^-}$ до $C_{(\tau)NO_3^-}$ і час від нуля до τ приводить до виразів:

$$C_{(\tau)NO_3^-} = C_{(\tau=0)NO_3^-} - k_0 \tau, \quad (17)$$

$$C_{(\tau)NO_3^-} = C_{(\tau=0)NO_3^-} * \exp(-k_1 \tau), \quad (18)$$

$$C_{(\tau)NO_3^-} = \frac{1}{k_2 \tau + \frac{1}{C_{(\tau=0)NO_3^-}}}. \quad (19)$$

Зіставлення (11–13) і (17–19) свідчить, що концентрації NO_3^- на виході з біофільтра при обох режимах біофільтрації будуть однаковими, якщо термін перебування нітратної води усередині біофільтра буде рівним як при прямому потоці (величина l/u), так і нульовому (величина τ).

Тобто, якщо нітратвмісна вода надходить в біофільтр дискретними порціями (залпом), то через проміжки часу $\tau = l/u$ на виході з біофільтра будуть отримані такі самі порції води з тим же ступенем денітрифікації, що і в режимі безперервного потоку, коли $u = l/\tau$.

Повнота денітрифікації залежатиме від початкових концентрацій як нітратів у воді, що очищується, так і поживних речовин у ній; виду використовуваної для денітрифікації мікрофлори та її активності на шляху біофільтрації; об'єму порцій води, яка поступає у біофільтр, і частоти її надходження. Останній чинник впливає на час гідравлічного утримання. Критичним фактором є також структура шару, що фільтрує, а саме – площа поверхні, доступна для біообростання, конфігурація пористого простору, товщина біообростання та його вік.

Обладнання, матеріали та методи експерименту. Біофільтри являли собою конструкцію U-подібної форми (рисунок 1), зручну для експлуатації як вироби "point of use". Корпуси пристроїв збирали зі стандартних полівінілхлоридних труб з внутрішнім діаметром 100 мм, заввишки 1500 мм, із заглушеним днищем і гідравлічною перемичкою з випускним хлипаком (вентилем), що знаходився на відстані 50 мм від заглушеного дна. У верхній частині кожної з труб, що утворюють U-подібну конструкцію, на відстані 200 мм від їх відкритих верхніх торців було зроблено отвори і вмонтовано патрубки для подачі води на фільтрацію й відведення відфільтрованої води. Таким чином, у вхідному коліні U-подібного біофільтра вода переміщу-

валась в напрямку «згори-вниз», а у вихідному – «знизу-вгору» і була можливість відбирати проби води на аналіз з нижньої частини біофільтра.



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд U-подібного біофільтра

Для здійснення *гетеротрофної денітрифікації* було застосовано фільтрувальне завантаження, що складалося з профільованих порожнистих поліпропіленових роликів з виробленими на їх поверхні денітрифікуючими біообростаннями. Калібр роликів завантаження становив 16x12 мм, площа поверхні в насипному виді – $1000 \text{ м}^2/\text{м}^3$, питомий об'єм вільного простору – 0.75 м^3 на 1 м^3 насипного матеріалу.

Фільтраційне завантаження для *автотрофної денітрифікації* [10] складалося з комбінації гранульованої сірки та мармурової крихти у співвідношенні 1:1,5 та іммобілізованих на них колоній автотрофної мікрофлори згідно з [11]. Діаметр гранул сірки й калібр зернин мармурової крихти перебували в межах 6–8 мм. Питомий об'єм порового простору у насипному масиві комбінованого завантаження становив приблизно $0,42 \text{ м}^3$ на 1 м^3 насипного матеріалу.

У кожному з колін біофільтрів довжина фільтраційного шляху дорівнювала 1200 мм. Водночас об'єм води, що заповнював поліпропіленове завантаження, становив 15 дм^3 , відповідно для завантаження з гранул сірки й мармуру він дорівнював 10 дм^3 .

Перший етап роботи не мав на меті використання певного штаму денітрифікуючих бактерій. Здатність до денітрифікації властива усім основним гетеротрофним мікроорганізм

мам активного мулу, що становлять переважну більшість у біоценозі [12]. Посівним матеріалом і водним середовищем для інкубування біообростання на наведених вище фільтрувальних завантаженнях була природна вода з річки Дніпро. Інкубаційні розчини готувалися з додаванням до води нітрату натрію, вихідна концентрація якого забезпечувалась на рівні 7 мМ/літр (595 мг/дм^3) (автотрофна денітрифікація). Для гетеротрофної денітрифікації в розчин додатково як постачальника органічного вуглецю додавали етиловий спирт в кількості, рекомендованій у роботі [13].

Для інкубації денітрифікуючих біообростань кожне з двох фільтрувальних завантажень розміщували в полікарбонатних місткостях (діаметром 26 см і заввишки 35 см) та заливали їх відповідними інкубаційними розчинами. Надалі за допомогою перистальтичних pomp здійснювали дуже повільне прокачування зазначених розчинів крізь поровий простір завантажень. Швидкість прокачування була на рівні $2,3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3/\text{с}$ ($\approx 2 \text{ л}$ на добу). Через проміжки часу від 1 до 3 діб проводили спостереження за станом завантажень і вимірювали концентрації: нітрат-іонів, розчиненого кисню і рН у циркулюючих розчинах. Процес інкубації становив від трьох до шести місяців, залежно від типу денітрифікаторів, при температурі ($18\text{--}25^\circ\text{C}$).

Упродовж зазначеного інкубаційного періоду колір завантажень під час появи біообростань поступово мінявся з білого на бежево-коричневий (денітрифікуючі гетеротрофи) і з жовто-білого на сірувато-жовтий (денітрифікуючі автотрофи). Водночас в обох інкубаційних розчинах з плином часу спостігалось зменшення концентрації нітратів у них. Надалі завантаження з іммобілізованими біообростаннями монтували в коліна біофільтрів.

Концентрація ($C_{\text{NO}_3^-}$) визначалася за допомогою іонометра лабораторного типу И-160 МИ, іон-селективний електрод Еліс -121NO₃. Робочий діапазон вимірювань концентрацій нітрат-іонів – $1 \cdot 10^{-1}\text{--}5 \cdot 10^{-5} \text{ М}$. Чутливість приладу – $5 \cdot 10^{-6} \text{ М}$.

Розчинений кисень ($\text{O}_2 \text{ мг/л}$) визначався за допомогою оксиметра типу AZ-8402.

Водневий показник (рН) визначався за допомогою іонометра лабораторного типу И-160 МИ, електрод – марки ЕСК 10603 рН.

Досліди ставили у чотирьох повторностях. Статистичне опрацювання результатів дослідження проводили за загальноприйняти-

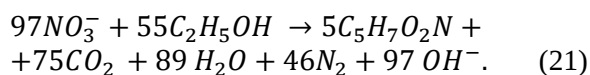
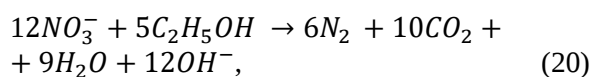
ми методами варіаційної статистики. Вірогідність різниці ($p < 0,05$) оцінювали за t -критерієм Стюдента; використовували прикладну програму «Microsoft Excel».

Виконання експериментів, результати та обговорення. Поява денітрифікуючих біооброствань на фільтрувальних завантажених супроводжувалася зменшенням концентрації нітрат-іонів в інкубаційних розчинах і зміною їх рН (рисунк 2).

На поліпропіленовому завантаженні денітрифікуючі біообростання проявляли себе істотно активніше, ніж на завантаженні з суміші гранул «сірка-мармур». Це пов'язано з тим, що у водному середовищі для інкубування денітрифікуючих гетеротрофів поряд з нітратами є надлишок етанолу, в складі якого міститься вуглець, що легко засвоюється гетеротрофами.

У автотрофів таких сприятливих умов не було. Їх розвиток залежав від асиміляції вуглецю зі сполук, наявних у воді як компонентів її мінерального складу (CO_2 і гідрокарбонати).

Гетеротрофна денітрифікація, пов'язана зі споживанням етанолу, описана в [14]. Запропоновано наступні рівняння бактеріального дихання та конструктивного метаболізму:



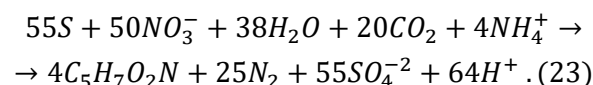
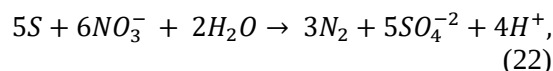
Рівняння (20) і (21) свідчать, що гетеротрофна денітрифікація при додаванні етанолу супроводжується підвищенням лужності водного середовища (рисунк 2, б).

У дослідженні [15] встановлено, що оптимальне співвідношення етанолу до нітрогену-нітрат-іону ($\text{N} - \text{NO}_3^-$) становило 1,07. Відповідно до [16] це співвідношення дорівнювало 1,62, що, ймовірно, залежить від виду гетеротрофів та умов їх існування.

Під час автотрофної денітрифікації в описуваному експерименті у ролі донора електронів використовувалась сірка і CO_2 як джерело вуглецю, що засвоюється біообростаннями.

Вуглекислий газ з атмосфери потрапляв у воду, а також утворювався в ній в результаті розчинення карбонатвмісних мінералів (мармур) під дією кислоти, що виділяється бактеріями біооброствань. Рівняння реакцій авто-

трофної денітрифікації за участю сірки як донора електронів згідно з [17] є наступними:



З огляду на вищенаведені реакції (22), (23), під час автотрофної денітрифікації на кожний моль спожитого NO_3^- утворюється 0,071 М біомаси та 0,5 моль газоподібного нітрогену. Мармур (вапняк), що взаємодіє з кислотою, яка продукується за рівняннями (22) і (23), забезпечує стабілізацію рН у воді, збільшуючи її буферну ємність внаслідок утворення гідрокарбонату кальцію:

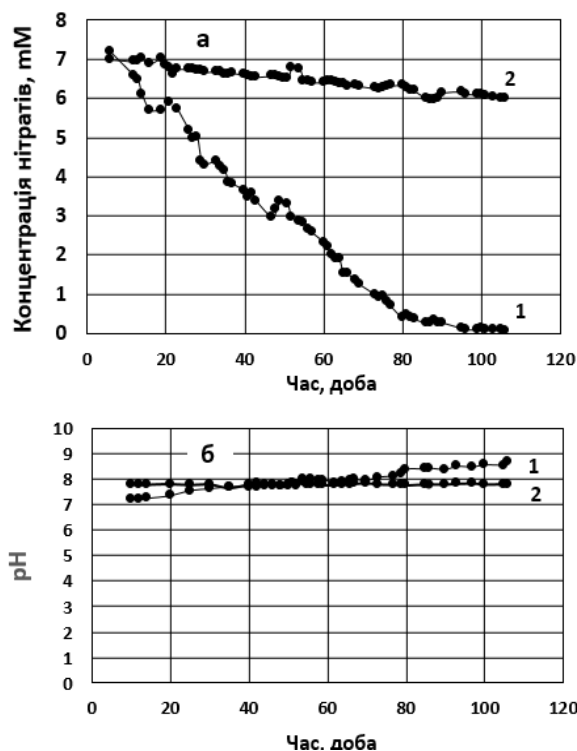
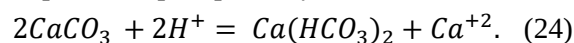


Рисунок 2 – а) динаміка зміни концентрації нітрат-іонів при інкубації денітрифікуючого біообростання на поліпропіленовому (1) і комбінованому «сірка-мармур» (2) завантаженнях; б) динаміка зміни рН при інкубації біообростання на зазначених завантаженнях

Результати вимірювань рН у процесах інкубування денітрифікуючих біооброствань (рисунк 2, б) засвідчують це. Так, у системі з завантаженням «сірка-мармур» поява і життєдіяльність автотрофних біооброствань не викликала помітної зміни рН інкубаційного розчину.

Формування гетеротрофних денітрифікуючих біооброствань на поліпропіленовому завантаженні вважали завершеним при досягненні концентрації іонів NO_3^- в інкубаційній рідині, нижчої за санітарно-гігієнічний норматив [4], водночас концентрація розчиненого кисню в пробах води, відібраної з донної частини інкубаційних місткостей не перевищувала 1 ppm. Результат, у випадку гетеротрофних біооброствань, був досягнутий до кінця третього місяця експерименту. Стосовно концентрації нітрат-іонів у воді, що заповнювала завантаження з суміші гранул «сірка-мармур», то вона залишалася високою, що впливає з відповідної кривої на рисунку 2, а, тому інкубування колоній денітрифікуючих автотрофів продовжували ще протягом трьох місяців.

Процес денітрифікації за допомогою інкубованих біооброствань на кожному з двох типів завантажень, які знаходилися в U-подібних корпусах біофільтрів, досліджували:

- *при безперервно проточному режимі* в замкнутому контурі. Витрати фільтрованої води становили: через завантаження «сірка-мармур» – 0,02 мл/с (1,7 л/добу), поліпропіленове завантаження – 0,029 мл/с (2,5 л/добу). Це пояснювалось тим, що об'єми порових просторів у цих завантаженнях співвідносилися як (1 до 1,5);

- *при періодично витіснювальному режимі* у відкритій системі. Вода, що містила нітрати, подавалася на біофільтрацію порціями (залпом) щодобово в один і той же час по 2,5 л в U-подібні пристрої з поліпропіленовим завантаженням і по 1,7 л із завантаженням суміші «сірка-мармур». Одночасно на виході з біофільтра отримували відповідно по 2,5 і 1,7 л очищеної води.

При використанні режиму витіснення час гідралічного утримання був таким же, як і при режимі безперервного потоку.

При безперервно проточному режимі на вхід біофільтра з поліпропіленовим завантаженням подавали воду з концентрацією нітрату натрію 2,3 мМ (195 мг/л NaNO_3 + 114 мг/л етилового спирту), у пристрій з сірко-мармуровим фільтраційним шаром 2,3 мМ (195 мг/л NaNO_3) без додавання спирту. Заздалегідь фільтруючі шари ретельно промивали відповідними розчинами зазначеного складу.

Надалі щодня в ході експерименту вимірювали концентрацію нітрат-іонів на вхідній ділянці пристроїв.

Кінетику процесів автотрофної і гетеротрофної денітрифікації води, що містила ніт-

рати, при безперервно проточному режимі зображено на рисунку 3, а. Якщо наведені експериментальні кінетичні криві подати в координатах

$$[2(C_0 - C_t) - \tau]; \quad [-\ln(C_t/C_0) - \tau];$$

$$\text{та } [0,1(1/C_t - 1/C_0) - \tau],$$

то тільки в разі $[-\ln(C_t/C_0) - \tau]$ вони трансформуються в прямі лінії. На рисунку 3, б зображено залежності логарифмів відношення поточних концентрацій нітрат-іонів до їх початкових значень від тривалості експерименту (τ). Вони характеризують порядок реакцій денітрифікації за нітрат-іонами на кожному з завантажень, що застосовувались. Отриманий результат дав можливість зробити висновок, по-перше, про рівномірний початковий розподіл денітрифікуючих біоплівки на поверхнях носіїв у біофільтрах; по-друге, кінетика денітрифікації на обох біофільтраційних завантаженнях у представленому експерименті відповідала реакціям першого порядку за нітрат-іонами.

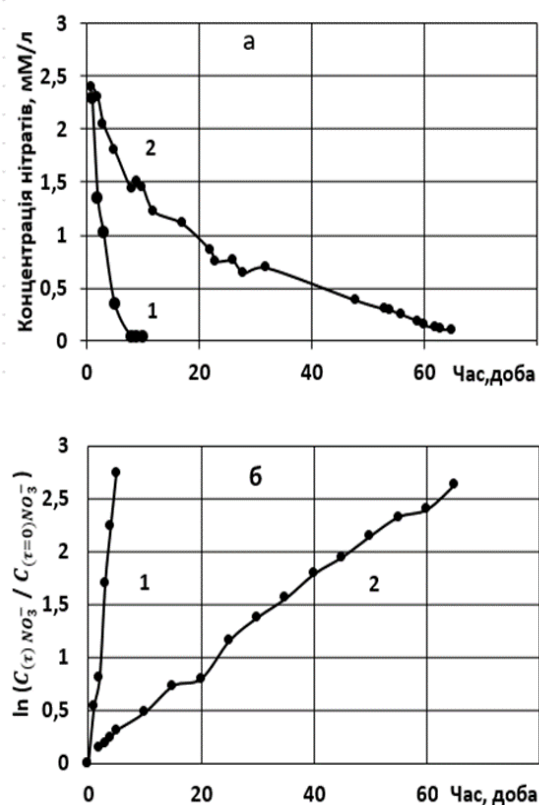


Рисунок 3 – а) кінетика процесів гетеротрофної (1) і автотрофної (2) денітрифікації при безперервно проточному режимі обробки води, яка містить нітрати, в замкнутому контурі U-подібних біофільтрів; б) результат обробки графіків рисунка 3, а в напівлогарифмічних координатах

Константи швидкостей реакції, обчислені за нахилами графіків рисунка 3, б, дорівнюють $0,56 \text{ доби}^{-1}$ ($6,48 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$) і $0,046 \text{ доби}^{-1}$ ($5,32 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$) для гетеротрофної і автотрофної денітрифікації відповідно. При однакових концентраціях нітрат-іонів у водному середовищі швидкість гетеротрофної денітрифікації приблизно на порядок вища швидкості автотрофної денітрифікації.

З наведених даних випливає, що при вихідних концентраціях нітрат-іонів у воді, рівних $2,3 \text{ мМ/л}$ (195 мг/л), для досягнення фізіологічно безпечних концентрацій їх на виході з біофільтрів [4] гідралічні терміни перебування води, що очищується, в просторах кожного з денітрифікуючих завантажень повинні становити близько 5 і 50 діб для гетеротрофного і автотрофного процесів відповідно.

Обставиною, яка ускладнює використання технології безперервної біофільтрації, є *кольматація* [2] біофільтраційного шару при обробці води з високою концентрацією нітратів. Це призводить до збільшення його гідралічного опору, вимагає застосування спеціальних дозуючих пристроїв і догляду за ними.

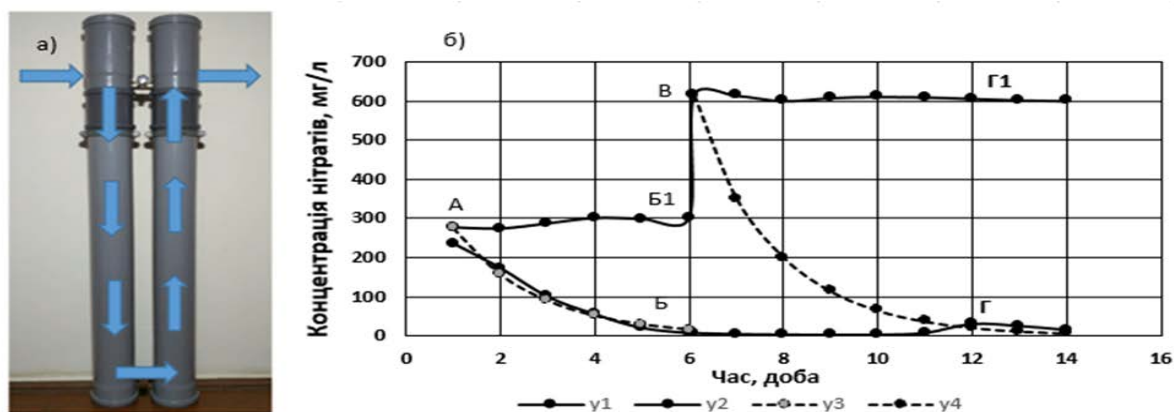
Альтернативою є витіснювальний режим біофільтраційної денітрифікації. В цьому разі вода, що містить нітрати, подається залповими порціями на вхід біофільтра через певні інтервали часу. Об'єм порцій вибирається таким, щоб гідралічний час їх перебу-

вання усередині біофільтра забезпечував потрібний ступінь зниження концентрації нітрат-іонів на виході.

Результати, отримані при здійсненні витіснювальної біофільтрації з перетворення нітрат-іонів на газоподібний нітроген під дією денітрифікуючого біобростання на поліпропіленовому завантаженні, зображено на рисунку 4.

Особливості виконання експерименту полягали в наступному. Спочатку завантаження біофільтра в U-подібному корпусі промивали водою, яка містила нітрати (концентрація $\text{NaNO}_3 = 280 \text{ мг/л}$) таким чином, щоб концентрації іонів NO_3^- на її вході та виході стали однаковими. Надалі у пристрій щодоби додавали по $2,5 \text{ л}$ води з тією самою концентрацією й вимірювали вміст нітрат-іонів у порціях фільтрату, що синхронно витікав з біофільтра.

Цій частині дослідження на графіках (рисунк 4, б) відповідають ділянки А-Б і А-Б1. Обробка результатів вимірів для ділянки А-Б за рівняннями (12), (18) з використанням значення $K = 0,56 \text{ доби}^{-1}$ підтвердила, що концентрації нітрат-іонів, які вимірювались на виході з біофільтра, також добре узгоджуються з уявленням про процес витіснювальної денітрифікації як реакції першого порядку в описаному експерименті.



y1 – концентрація нітрат-іонів у поданих порціях води; y2 – концентрація нітрат-іонів у порціях фільтрату; y3 та y4 – результати розрахунків за рівнянням (18)

Рисунок 4 – Фото U-подібного біофільтра та динаміка денітрифікації щоденної порції (2,5 л) води при витіснювальному режимі

Результати виконаних розрахунків показані на ділянці А-Б пунктиром (y3) на рисунку 4, б. Після того, як концентрації

нітрат-іонів у щоденно отримуваних порціях денітрифікованої води наблизилися до нуля (точка Б на рисунку 4, б), концентрацію

нітрату натрію в наступних порціях води, спрямованої на витіснювальну біофільтрацію, збільшили до 600 мг/л. Це демонструють точка В на рисунку 4, б і ділянка В-Г1. Перехід до нових умов біофільтрації привів через шість діб безперервного експерименту до невеликого підйому концентрації нітрат-іонів у порціях отриманого фільтрату, як показано на ділянці Б-Г.

Результат узгоджується з розрахунковим значенням зниження концентрації нітрат-іонів у фільтраті (див. пункт В-Г), що отримано за рівнянням (18) з підставленням

у нього $K = 0,56 \text{ доби}^{-1}$, і поточного часу перебування порції води в денітрифікаторі при $\tau = 6$, який відлічується з моменту переходу на нову умову біофільтрації.

Хронологію послідовного переміщення денітрифікованої води за траєкторією біофільтрації в створених апаратах зображує серія стовпців з індексом у1 на рисунку 5, Б. Водночас висоти стовпців з індексами у2 і у3 демонструють, як відбувається зниження вмісту нітрат-іонів у порціях фільтрованої води, коли видалення нітратів забезпечують автотрофи (у2) і гетеротрофи (у3) відповідно.

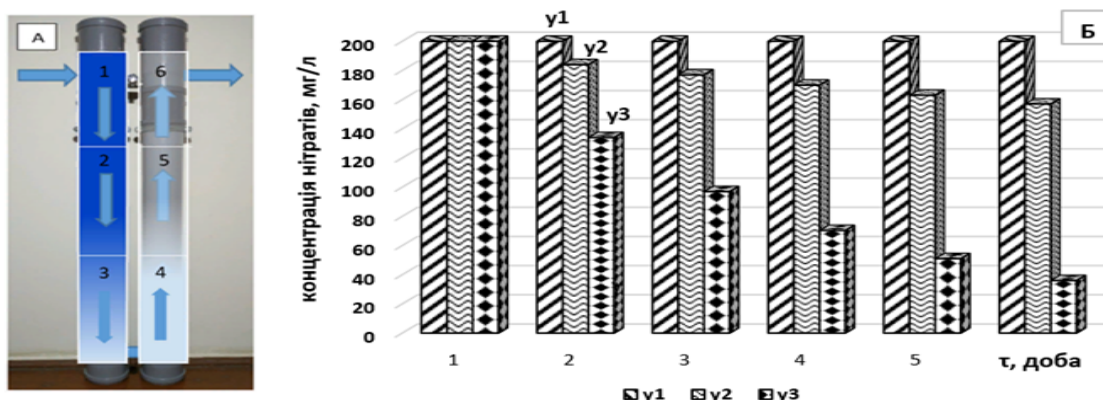


Рисунок 5 – Хронологія переміщення порцій води за траєкторією біофільтрації в U-подібних пристроях з завантаженнями з поліпропілену і суміші «сірка-мармур» та динаміка змін концентрації нітратів у них. Цифри на виділених ділянках рисунка 5, А і на осі абсцис рисунка 5, Б відповідають відліку часу в добах

Оскільки представлений біофільтр являє собою реактор ідеального витіснення, порції води, яка подається на очищення, практично не змішуються одна з одною. Розроблений біофільтр є саморегульованою системою. Як показали тривали випробування, його водоочисна здатність багаторазово збільшується під час безперервної роботи.

Регулярні подавання порцій води в денітрифікатор забезпечують нормалізацію активності біообростання в його поровому просторі. Це підвищує стабільність роботи біофільтра та усуває необхідність у спеціальних дозувальних і промивних пристроях. При такому способі експлуатації біофільтр може працювати тривалий час без засмічення і колюматції.

Висновки. У роботі наведено результати дослідження процесу денітрифікації питної води методами прямої й витіснювальної біофільтрації в спеціально розроблених малогабаритних фільтраційних пристроях, призна-

чених для систем децентралізованої водопідготовки.

Оптимізація конструкції пристрою та структури фільтраційного простору дає змогу як *альтернативу* прямої витіснювальній біофільтрації. В цьому разі споживач має можливість періодично подавати великі порції води в біофільтр і синхронно отримувати таку ж кількість денітрифікованого фільтрату.

Порівняння ефективності функціонування автотрофних і гетеротрофних бактерій у досліджених фільтраційних шарах дає можливість припустити, що кожні з них можуть використовуватись для денітрифікації води. Гетеротрофна денітрифікація є кращою у малогабаритних пристроях, адже гетеротрофні денітрифікуючі бактерії переробляють нітрати на порядок швидше, ніж автотрофні.

Зміна прямої витіснювальної біофільтрації на витіснювальний має такі переваги:

- зникає необхідність використовувати периферійне обладнання для підтримки безперервного, повільного потоку води крізь біофільтр;
- споживач отримує можливість направляти великі порції води залпом на біофільтрацію й одночасно отримувати рівні порції денітрифікованої води для задоволення власних потреб;
- виготовлення біофільтрів описаної конструкції та їх експлуатація не вимагають не виправданих витрат матеріалів та енергії;
- перерва в роботі біофільтра на певний час не погіршує його здатність денітрифікувати забруднену воду, коли процес очищення знову буде поновлено.

Список використаних джерел

- [1] Archana, S. K. Sharma, and R. Ch. Sobti, "Nitrate removal from ground water", *A Review. E-Journal of Chemistry*, vol. 4, no. 9, pp. 1667-1675, 2012. [Online]. Available: <https://downloads.hindawi.com/journals/jchem/2012/154616.pdf/>
- [2] П. І. Гвоздяк, та О. В. Сапура, "Денітрифікація питної води з використанням пробіотичних бактерій", *Мікробіологія і біотехнологія*, № 2, с. 81-89, 2017.
- [3] О. В. Зоріна, "Імплементация в Україні директиви 98/83/ЄС про якість води, призначеної для споживання людиною", *Гігієна населених місць*, № 63, с. 85-92, 2014.
- [4] Державні санітарні норми та правила "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" (ДСанПіН 2.2.4-171-10), із змінами і доповненнями.
- [5] Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2018 році. [Електронний ресурс]: електрон. дані. Режим доступу: <https://www.minregion.gov.ua/wpcontent/uploads/2019/11/Proekt-Nats.-dop.-za-2018.pdf> вільний
- [6] M. C. Lee, K. K. Lee, Y. Hyun, T. P. Clement, and D. Hamilton, "Nitrogen transformation and transport modelling in groundwater aquifer", *Ecol. Model.*, vol. 192, no. 1-2, pp. 143-159, 2006. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.07.013.
- [7] M. Calderer, I. Jubany, R. Perez, V. Marty, and J. de Pablo, "Modelling enhanced groundwater denitrification in batch microcosm tests", *Chem. Eng. J.*, vol. 165, no. 1, pp. 2-9, 2010. doi: 10.1016/j.cej.2010.08.042.
- [8] N. J. Horan, *Biological wastewater treatment systems: theory and operation*, Chichester, West Sussex UK: John Wiley & Sons Ltd., 1990. ISBN: 0471924253.
- [9] B. A. Bekins, E. Warren, and E. M. Godsy, "A comparison of zero-order, first-order, and Monod biotransformation models", *Ground Water*, vol. 36, no. 2, pp. 261-268, 1998. doi: 10.1111/j.1745-6584.1998.tb01091.x.
- [10] T. C. Zhang, and D. G. Lampe, "Sulfur: limestone autotrophic denitrification processes for treatment of nitrate-contaminated water: batch experiments", *Water Res.*, no. 33, pp. 599-608, 1999. doi: 10.1016/S0043-1354(98)00281-4.
- [11] W. L. Zhou et al., "Autotrophic denitrification for nitrate and nitrite removal using sulfur-limestone", *Journal of Environ. Sciences*, vol. 23, no. 11, pp. 1761-1769, 2011. doi: 10.1016/S1001-0742(10)60635-3.
- [12] А. Н. Эпов, Д. А. Данилович, и М. А. Канунникова, "Анализ методик расчетов процесса нитро-денитрификации, используемых в мировой практике и их развитие (ч. 1)", *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*, № 3, с. 22-35, 2018.
- [13] M. Green, M. Shnitzer, S. Tarre, B. Bogdan, G. Shelef, and C. J. Sorden, "Fluidized bed reactor operation for groundwater denitrification", *Water Sci. Technol.*, vol. 29, no. 10-11, pp. 509-515, 1994. doi: 10.2166/wst.1994.0798.
- [14] A. Mosheni-Bandoi, D. J. Elliot, and M. A. Zazouli, "Biological nitrate removal processes from drinking water supply – a review", *J. Environ. Health Sci. Eng.*, vol. 11, no. 35, Dec. 2013. doi: 10.1186/2052-336X-11-35.
- [15] M. A. Gomez, J. M. Galvez, E. Hontoria, and J. Gonzalez-Lopez, "Influence of ethanol concentration on biofilm bacterial composition from denitrifying submerged filter used for contaminated groundwater", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 95, no. 3, pp. 245-251, 2003. doi: 10.1016/S1389-1723(03)80024-5.

- [16] P. F. Rodrigues-Escales, "Modeling of enhanced in situ biodenitrification at different scales", PhD thesis, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, July 2014.
- [17] B. Batchelor, and A. W. Lawrence, "Autotrophic denitrification using elemental sulfur", *J. Water Poll. Cont. Fed.*, vol. 50, no. 8, pp. 1986-2001, 1978. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/25040378>
- ### References
- [1] Archana, S. K. Sharma, and R. Ch. Sobti, "Nitrate removal from ground water", *A Review. E-Journal of Chemistry*, vol. 4, no. 9, pp. 1667-1675, 2012. [Online]. Available: <https://downloads.hindawi.com/journals/jchem/2012/154616.pdf/>
- [2] P. I. Hvozdiak, and O. V. Sapura, "Denitrification of drinking water using probiotic bacteria", *Mikrobiologiya i biotekhnologiya*, no. 2, pp. 81-89, 2017 [in Ukrainian].
- [3] O. V. Zorina, "Implementation in Ukraine of Directive 98/83/EU on the quality of water intended for human consumption", *Hihhienna naselenykh mist*, no. 63, pp. 85-92, 2014 [in Ukrainian].
- [4] State sanitary norms and rules "Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption" (DSanPiN 2.2.4-171-10), as amended [in Ukrainian].
- [5] National report on drinking water quality and drinking water supply in Ukraine in 2018. [Online]. Available: <https://www.minregion.gov.ua/wpcontent/uploads/2019/11/Proekt-Nats.-dop.-za-2018.pdf> vilnyi [in Ukrainian].
- [6] M. C. Lee, K. K. Lee, Y. Hyun, T. P. Clement, and D. Hamilton, "Nitrogen transformation and transport modelling in groundwater aquifer", *Ecol. Model.*, vol. 192, no. 1-2, pp. 143-159, 2006. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.07.013.
- [7] M. Calderer, I. Jubany, R. Perez, V. Marty, and J. de Pablo, "Modelling enhanced groundwater denitrification in batch microcosm tests", *Chem. Eng. J.*, vol. 165, no. 1, pp. 2-9, 2010. doi: 10.1016/j.cej.2010.08.042.
- [8] N. J. Horan, *Biological wastewater treatment systems: theory and operation*, Chichester, West Sussex UK: John Wiley & Sons Ltd., 1990. ISBN: 0471924253.
- [9] B. A. Bekins, E. Warren, and E. M. Godsy, "A comparison of zero-order, first-order, and Monod biotransformation models", *Ground Water*, vol. 36, no. 2, pp. 261-268, 1998. doi: 10.1111/j.1745-6584.1998.tb01091.x.
- [10] T. C. Zhang, and D. G. Lampe, "Sulfur: limestone autotrophic denitrification processes for treatment of nitrate-contaminated water: batch experiments", *Water Res.*, no. 33, pp. 599-608, 1999. doi: 10.1016/S0043-1354(98)00281-4.
- [11] W. L. Zhou et al., "Autotrophic denitrification for nitrate and nitrite removal using sulfur-limestone", *Journal of Environmental Sciences*, vol. 23, no. 11, pp. 1761-1769, 2011. doi: 10.1016/s1001-0742(10)60635-3.
- [12] A. N. Epov, D. A. Danilovich, and M. A. Kanunnikova, "Analysis of methods for calculating the nitro-denitrification process used in world practice and their development (part 1)", *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzheniye*, no. 3, pp. 22-35. (2018) [in Russian].
- [13] M. Green, M. Shnitzer, S. Tarre, B. Bogdan, G. Shelef, and C. J. Sorden, "Fluidized bed reactor operation for groundwater denitrification", *Water Sci. Technol.*, vol. 29, no. 10-11, pp. 509-515, 1994. doi: 10.2166/wst.1994.0798.
- [14] A. Mosheni-Bandoi, D. J. Elliot, and M. A. Zazouli, "Biological nitrate removal processes from drinking water supply – a review", *J. Environ. Health Sci. Eng.*, vol. 11, no. 35, Dec. 2013. doi: 10.1186/2052-336X-11-35.
- [15] M. A. Gomez, J. M. Galvez, E. Hontoria, and J. Gonzalez-Lopez, "Influence of ethanol concentration on biofilm bacterial composition from denitrifying submerged filter used for contaminated groundwater", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 95, no. 3, pp. 245-251, 2003. doi: 10.1016/S1389-1723(03)80024-5.
- [16] P. F. Rodrigues-Escales, "Modeling of enhanced in situ biodenitrification at different scales", PhD thesis, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, July 2014.
- [17] B. Batchelor, and A. W. Lawrence, "Autotrophic denitrification using elemental sulfur", *J. Water Poll. Cont. Fed.*, vol. 50, no. 8, pp. 1986-2001, 1978. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/25040378>.

A. S. Chernova¹, Master's student,
V. S. Gevod¹, D. Chem. Sc., associate professor,
e-mail: aquilegya@ua.fm

A. U. Isayeva², D. Biol. Sc., professor,
director of the Research Institute of Ecology and Biotechnology

¹Ukrainian State University of Chemical Technology
Gagarin Ave., 8, Dnipro, 49005, Ukraine

²Research Institute of Ecology and Biotechnology of Shymkent University
Tauke khan Ave., 5, Shymkent, 160012, Kazakhstan

COMPARISON OF DIRECT-FLOW AND DISPLACEMENT BIOFILTRATION IN DECENTRALIZED WATER TREATMENT DEVICES

At present, a serious issue is the contamination of groundwater by nitrates. The peculiarity of these substances consists in the difficulty of removal and the need to use expensive technologies. The health risk is the most essential to the population of regions with a lack of centralized water supply and low incomes.

This work has been aimed at the evaluation of the effectiveness of decentralized purification of nitrate-contaminated water by the methods of direct flowing and piston (displacement) biofiltration. Despite the existing warnings, biofiltration is an effective and economic means of water denitrification. The combined use of biofiltration with available, proven, and effective methods of post-treatment of the filtrate, for example, bubble-film extraction and UV sterilization, provides high-quality tap water at sites where there is no centralized water supply.

In this paper, denitrification has been studied by the direct-flowing and displacement biofiltration methods in the specially designed small-sized filtration devices of the "Point of use" type with the use of heterotrophs and autotrophs as agents of denitrification reactions. Heterotrophic denitrification is preferred in small-sized devices due to the rate of the process, which is an order of magnitude higher than autotrophic denitrification does. The results of studies of biofilter, with the optimal structure of the filtration bed, allow one to recommend the use of the piston biofiltration, as an alternative to direct flowing mode. This alternative has the following advantages. The consumer has the opportunity to periodically feed big portions of water contaminated with nitrates into the biofilter and simultaneously receive an equal portion of purified water that meets the sanitary and hygienic standards. A regular supply of water portions for denitrification ensures normalization of biofouling activity inside the biofiltration bed, which increases the stability of the biofilter action and eliminates the need for special dosing and flushing devices. In this mode of operation, the biofilter can run for a long time without clogging. The design of the created biofilters is simple, standardized parts, components, and materials, including easily recyclable ones, can be used for their assembly.

Keywords: denitrification, biological reactor, displacement filtration, environmental friendliness, economy.

УДК 633.522+543.544

[0000-0001-7511-5126] **С. В. Шкурдода**¹, завідувач відділу досліджень матеріалів, речовин та виробів,
e-mail: sergeyshkur@yahoo.com

[0000-0002-5937-167X] **Т. В. Солодовнік**², к.х.н., доцент,
e-mail: solodovniktetana@gmail.com

[0000-0002-8026-1483] **В. В. Пасічник**¹, заступник завідувача сектору досліджень,

[0000-0002-5253-232X] **К. П. Король**¹, завідувач сектору досліджень,

[0000-0003-1400-6131] **Д. Ю. Шинкаренко**¹, головний судовий експерт

¹Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС
вул. Пастерівська, 104, м. Черкаси, 18000, Україна

²Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ Δ 9-ТЕТРАГІДРОКАНАБІНОЛУ В НАСІННІ КОНОПЕЛЬ МЕТОДОМ ГАЗОВОЇ ХРОМАТОГРАФІЇ: АНАЛІЗ І НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

У статті піддаються предметному аналізу методики рідинно-рідинної екстракції Δ -9-ТГК з конопляного насіння з подальшою їх апробацією й удосконаленням для відділення заважаючих фракцій, насамперед жирів (олій), та з наступною ідентифікацією Δ -9-ТГК методом газової хромато-мас-спектрометрії з мас-селективним детектуванням. Апробовано деякі методи рідинно-рідинної екстракції конопляного насіння. Отримані результати досліджень дають змогу визначити наявність Δ -9-ТГК в насінні конопель та продуктах харчування, виготовлених з насіння конопель. Встановлено, що метод екстракції ацетонітрилом з подальшим промиванням гексаном є найбільш ефективним і легко відтворюваним та може бути рекомендованим для якісного визначення Δ -9-ТГК в незначних концентраціях у насінні конопель. Дані дослідження надалі можуть бути використані для кількісного визначення Δ -9-ТГК в насінні конопель та продуктах харчування, виготовлених з насіння конопель, із подальшим визначенням межі детектування (LOD) та межі кількісного виявлення (LOQ) зазначеної речовини, що необхідно для подальшої сертифікації цієї продукції та її експорту.

Ключові слова: Δ 9-ТГК, технічні коноплі, конопляне насіння, канабіноїди, екстракція, газова хромато-мас-спектрометрія.

Вступ. Коноплі (*Cannabis sativa* L) як одна з найдавніших і широко поширених рослин є важливим складником добробуту населення впродовж багатьох століть завдяки специфічним біологічним особливостям цієї луб'яної, олійної культури та унікальним споживчим властивостям конопляної продукції. Разом з тим рослини конопель також відомі як лікарські і наркотичні рослини.

До особливостей видільної системи конопель відноситься їх спроможність виведення волосками назовні рослин секретів, які, в свою чергу, містять канабіноїди – групу терпенфенольних сполук, що є похідними 2-заміщеного 5-амілрезорцину. До складу конопель входить близько 100 різних канабіноїдів [1], які поділяють на кілька типів (канабігероли, канабіхромени, канабідіоли, тетрагідроканабіноли, канабіельзони, ізо-тетрагідроканабіноли, канабіциклоли, канабі-

тріоли) [2]. Однак до основних канабіноїдів відносять лише декілька, зокрема: тетрагідроканабінол (ТГК), канабінол (КБН), канабідіол (КБД), канабігерол (КБГ), канабіхромен (КБХ) та відповідні їм кислоти – тетрагідроканабінолова (ТГКК), канабінолова (КБНК), канабідіолова (КБДК), канабігеролова (КБГК), канабіхроменова (КБХК) [3, 4].

Психотропний ефект наркотичного засобу канабісу є результатом комплексної дії всіх канабіноїдів, хоча лише деякі з них мають психотропну дію в чистому вигляді. До них належить, насамперед, дельта-9-тетрагідроканабінол (Δ -9-ТГК), що має основну психотропну дію і здатний селективно зв'язуватися в певних структурах головного мозку з канабіноїдними рецепторами. Такі основні канабіноїди, як КБД, КБН, КБХ, КБГ, самі по собі не мають психотропної дії, проте здатні вносити деякі доповнення в психотропну дію ТГК.

Враховуючи психотропний ефект Δ -9-ТГК, вирощування технічних конопель у більшості країн світу потрапляє під певні види ліцензування та регулюється відповідними державними органами відповідних країн, у тому числі й в Україні.

Так, відповідно до ст. 7 Закону України від 15.02.1995 № 60/95-ВР «Про обіг в Україні наркотичних засобів, психотропних речовин, їх аналогів і прекурсорів» (у редакції Закону України від 22.12.2006 № 530-V) заборонено культивування, використання або реалізацію рослин, які входять до переліку наркотичних засобів, психотропних речовин і прекурсорів, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 06.05.2000 № 770, що містить низький вміст наркотичних засобів для промислових цілей, виняток становить виробництво або виготовлення наркотичних засобів і психотропних речовин, яке можуть здійснювати підприємства всіх форм власності за наявності у них ліцензії на здійснення відповідних видів діяльності. Гранично допустимий вміст тетрагідроканнабінолу у рослинах конопель установлюється Кабінетом Міністрів України за поданням спеціально уповноваженого органу виконавчої влади в галузі охорони здоров'я.

Для промислових цілей культивування рослин конопель, за винятком виробництва та виготовлення наркотичних засобів і психотропних речовин, на сьогоднішній день допускається, якщо насіння зібране з тих сортів рослин, у висушеній соломі яких вміст тетрагідроканнабінолу не перевищує 0,08 %. В деяких інших країнах ця цифра коливається в межах від 0,2 до 0,3 % [5].

Незважаючи на психотропний ефект Δ -9-ТГК, потреба в продукції коноплярства дотепер не втрачає свою актуальність.

Гігієнічне природне волокно конопель за своїми властивостями переважає синтетичне волокно в багатьох галузях народного господарства [6]. Волокно конопель дуже міцне, повільно піддається гниттю, довго зберігає свої властивості при експлуатації у морській воді та інших агресивних середовищах, завдяки чому широко використовується для виготовлення різних виробів промисловості високої надійності та для виготовлення одягу, взуття і текстильних виробів.

Особливим попитом на ринку користується конопляне насіння як продовольчий товар. Використовують насіння також як посів-

ний матеріал, на кормові цілі для худоби та птиці, для виготовлення приманок для риб і як харчовий продукт для людини.

Останнім часом конопляне насіння відносять до категорії «суперїжі» (superfood) – природної сировини рослинного походження, яка відзначається підвищеним вмістом білків, вітамінів, мінералів, незамінних кислот, антиоксидантів, інших корисних речовин, воно має мінімум калорій і застосовується як біологічно активна добавка до їжі для здорового харчування людини [7, 8].

До складу конопляного насіння входять 25–35 % олії, 20–25 % білків, 20–30 % вуглеводів, 10–15 % клітковини, ненасичені жирні кислоти (Омега-3, -6, -9), незамінні амінокислоти, вітаміни, макро- та мікроелементи [7–10]. Обрушене насіння (після відділення оболонки) містить у середньому 46,7 % олії та 35,9 % білків [7]. Концентрація антинутриєнтів, таких як фітинова кислота, таніни та інгібітори трипсину, в конопляному насінні дуже низька, що, в свою чергу, зумовлює високу засвоюваність корисних речовин [11]. У насінні конопель виділено такі найважливіші кислоти: насичені – пальмітинова, стеаринова, арахідова, бегенова; ненасичені – лінолева (Омега-6), олеїнова (Омега-9), альфа-ліноленова (Омега-3), гамма-ліноленова [6–8]. Співвідношення лінолевої (Омега-6) до альфа-ліноленової кислоти (Омега-3) в середньому становить 2,0:1÷3,7:1, що відповідає вимогам Всесвітньої організації охорони здоров'я Організації Об'єднаних Націй (ВООЗ ООН) для забезпечення організму людини ненасиченими жирними кислотами (ННЖК) [7–9].

Враховуючи високу біологічну і харчову цінність, з насіння конопель виготовляють обрушене конопляне насіння, конопляну олію, конопляне борошно, висівки конопляні (клітковина), конопляний протеїн, навіть дитяче харчування – замітник молока.

В результаті постійно зростаючого споживання харчових продуктів з насіння конопель, зокрема олії, були деякі повідомлення про те, що прийом конопляної олії може спричинити позитивний наркотичний тест на вживання канабісу [12–15]. Дослідження, проведені з цього питання різними науковцями, показали, що насіння справді може містити Δ -9-ТГК у широкому діапазоні концентрацій [15–23]. Водночас концентрація Δ -9-ТГК коливається залежно від того, з технічних чи медичних конопель зібрано урожай. Так, у конопляному

насінні технічних сортів концентрація Δ -9-ТГК може коливатися від 0 до 12 мкг/г, а в сортах медичних конопель з високим вмістом Δ -9-ТГК – від 35,6 до 124 мкг/г [23].

Відомо, що на сучасному етапі розвитку у виробництві конопель України відбуваються процеси трансформації до ринкових умов, а також процеси та періоди становлення, що пов'язано зі збільшенням посівних площ технічних конопель і збільшенням обсягів виробництва лубоволокнистої сировини. Останнім часом наукові установи активізують селекцію та впроваджують на підприємствах новітні технології переробки насіння конопель у харчові оздоровчі продукти та парфумерно-косметичні препарати. В зв'язку з цим виникає необхідність у вдосконаленні та розробці ефективних, простих у використанні та надійних методик екстракції й ідентифікації Δ -9-ТГК в конопляному насінні та відповідній харчовій продукції з нього (обрушеному конопляному насінні, конопляній олії, конопляному борошні, клітковині, конопляному протеїні).

Метою дослідження є аналіз наявних методик рідинно-рідинної екстракції Δ -9-ТГК з конопляного насіння з подальшою їх апробацією й удосконаленням для відділення заважаючих фракцій, насамперед жирів (олій), та з наступною ідентифікацією Δ -9-ТГК методом газової хромато-мас-спектрометрії з мас-селективним детектуванням.

Матеріали, інструменти та методики дослідження. Об'єктом дослідження було конопляне насіння врожаю 2020 р., зібране з технічної коноплі сорту «Гляна», культивованого з рослин роду коноплі для промислових цілей, що допускається законодавством України відповідно до [24], тобто зібраного із сортів рослин конопель, у висушеній соломі яких вміст Δ -9-ТГК не перевищує 0,08 %.

Як стандарт використовували розчин Δ -9-ТГК в етанолі концентрацією 5 мг/см³ виробництва фірми Lipomed AG (LOT: 135.1B70.0L6.), який додатково розводили етанолом до концентрацій 1 мг/см³ і 0,1 мг/см³.

Для ідентифікації Δ -9-ТГК використовували газовий хроматограф Agilent Technologies 6890N (ГХ) з мас-селективним детектором Agilent Technologies 5975B (МСД). Хроматографічна колонка J&W, HP-5MS (30,0 м х 0,25 мм х 0,25 мкм). Температурна програма термостата: початкова температура – 200 °C (1 хв.) і поступовий підйом

температури зі швидкістю 25 °C/хв до 280 °C (8 хв.). Режим вводу проби: з поділом потоку (Split 5:1). Газ-носії – гелій. Об'єм проби – 2 мкл. Режим роботи МСД – за повним йонним струмом (SCAN).

Для здійснення процесу екстракції та центрифугування з подальшою фільтрацією використовували ультразвукову ванну (УЗВ) і центрифугу ОПН-8.

Для приготування розчинів та для виконання аналізу використовувався стандартизований скляний мірний посуд.

В процесі пробопідготовки досліджуваного конопляного насіння використовували методику цільової екстракції Δ -9-ТГК з метою відділення та ізолювання речовин (насамперед жирів), які можуть заважати дослідженню. Для кожного методу були попередньо підготовлені два зразки насіння (А і В). Зразок А – вихідне конопляне насіння, зразок В – конопляне насіння зі штучно внесеною кількістю стандартного розчину Δ -9-ТГК (в перерахунку на масу – 20 мкг).

Виклад основного матеріалу. В роботі було проведено дослідження за чотирма методами якісного виявлення Δ -9-ТГК в конопляному насінні рідинно-рідинною екстракцією та порівняння ефективності і зручності їх застосування в професійних лабораторіях профільного призначення на основі аналізу хроматограм, отриманих методом газової хроматографії з мас-селективним детектуванням. На базі лабораторії відділу дослідження матеріалів, речовин і виробів Черкаського науково-дослідного експертно-криміналістичного центру Міністерства внутрішніх справ України в усіх досліджуваних зразках насіння було встановлено відсутність Δ -9-ТГК за методикою [4] в межах її чутливості.

Відповідно до *методу № 1* [15] до попередньо гомогенізованих наважок насіння (зразки А₁ і В₁) масою по 500 мг кожна додавали по 4 см³ 0,2 н розчину калій гідроксиду (КОН) в метанолі. Отримані суміші поміщали в ультразвукову ванну та екстрагували впродовж 30 хв., після чого проводили центрифугування для відділення нерозчинних домішок при 4000 об/хв. впродовж 10 хв. і фільтрували через складчастий паперовий фільтр. Далі проводили чотирикратне промивання фільтрату порціями гексану об'ємом 5 см³. Верхній шар органічних сполук відкидали. Під час останнього промивання до гексану додавали

1 см³ дейонізованої води для зменшення змішування гексану з метанолом. Верхній органічний шар відкидали. До розчину додавали 1,5 см³ 1 М розчину хлороводневої кислоти (HCl) та проводили екстракцію 5 см³ 10 % (об./об.) етилацетату в гексані. Верхній органічний шар переносили у чистий скляний бюкс і випаровували в потоці теплого повітря. До сухого залишку додавали 1,0 см³ етилацетату та переносили до віали з подальшим проведенням аналізу методом ГХ-МС.

Відповідно до **методу № 2** до попередньо гомогенізованих наважок насіння (зразки A₂ і B₂) масою по 500 мг кожна додавали по 5 см³ ацетонітрилу. Суміш поміщали в ультразвукову ванну та екстрагували впродовж 30 хв., після чого проводили центрифугування для відділення нерозчинних домішок при 4000 об/хв. впродовж 10 хв. та фільтрували через складчастий паперовий фільтр. Далі проводили трикратне промивання фільтрату порціями гексану об'ємом 5 см³. Нижній органічний шар об'ємом 5 см³ переносили у чистий скляний бюкс і випаровували в потоці теплого повітря до об'єму 1 см³. Отриманий розчин переносили до віали з подальшим проведенням аналізу методом ГХ-МС.

За **методом № 3** до попередньо гомогенізованих наважок насіння (зразки A₃ і B₃) масою по 500 мг кожна додавали по 5 см³ етанолу. Суміші поміщали в ультразвукову ванну та екстрагували впродовж 30 хв., а потім суміші переносили до морозильної камери (-15 °C) на 2 год. Далі проводили центрифугування для відділення нерозчинних домішок при 4000 об/хв. впродовж 10 хв. та фільтрували через складчастий паперовий фільтр. Фільтрат об'ємом 5 см³ переносили у скляний бюкс і випаровували в потоці теплого повітря до об'єму 1 см³. Отриманий розчин переносили до віали з подальшим проведенням аналізу методом ГХ-МС.

Сутність **методу № 4** полягає в тому, що до попередньо гомогенізованих наважок насіння (зразки A₄ і B₄) масою по 500 мг кожна додавали по 5 см³ етанолу та по 5 см³ дейонізованої води. Суміш поміщали в ультразвукову ванну та екстрагували впродовж 30 хв., після чого її переносили до морозильної камери (-15 °C) на 2 год. Далі проводили центрифугування для відділення нерозчинних домішок при 4000 об/хв. впродовж 10 хв. та

фільтрували через складчастий паперовий фільтр.

Фільтрат тричі екстрагували хлороформом порціями по 2 см³. Хлороформні екстракти відділяли, переносили до скляного бюкса і випаровували в потоці теплого повітря. До сухого залишку додавали 1 см³ етилацетату, переносили до віали з подальшим проведенням аналізу методом ГХ-МС.

Результати досліджень та їх обговорення. Аналізуючи отримані за методом № 1 результати для зразка A₁, встановлено, що на хроматограмі досліджуваного екстракту без штучно внесеного Δ-9-ТГК:

- спостерігаються піки досить значної інтенсивності, які відповідають за часом утримання Linoleic Acid (лінолева кислота) та Linoleic Acid methyl ester (метилловий естер лінолевої кислоти);

- спостерігаються піки середньої інтенсивності, які відповідають за часом утримання Palmitic Acid (пальмітинова кислота), Palmitic Acid methyl ester (метилловий естер пальмітинової кислоти), Stearic Acid (стеаринова кислота), Arachidonic Acid (арахідонова кислота) тощо;

- не виявлено піка речовини, мас-спектр якої було ідентифіковано як Dronabinol (дронабінол, тетрагідроканнабінол, ТГК, Δ-9-ТГК) у межах чутливості проведеного методу дослідження.

Для досліджуваного екстракту зі штучно внесеною кількістю Δ-9-ТГК (зразок B₁), отриманого за методом № 1 (рисунок 1), виявлено:

- піки досить значної інтенсивності, що відповідають за часом утримання Linoleic Acid (лінолева кислота) та Linoleic Acid methyl ester (метилловий естер лінолевої кислоти);

- піки середньої інтенсивності, що відповідають за часом утримання Palmitic Acid (пальмітинова кислота), Palmitic Acid methyl ester (метилловий естер пальмітинової кислоти), Stearic Acid (стеаринова кислота), Arachidonic Acid (арахідонова кислота) тощо;

- пік середньої інтенсивності, що за часом утримання (RT = 5,767 хв.) відповідає речовині, мас-спектр якої ідентифіковано як Dronabinol (дронабінол, тетрагідроканнабінол, ТГК, Δ-9-ТГК).

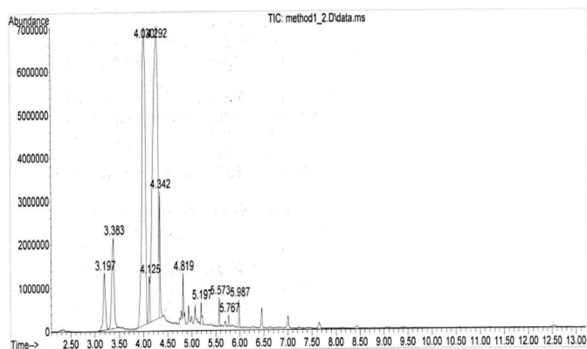


Рисунок 1 – Хроматограма, отримана при визначенні Δ -9-ТГК за методом № 1

Аналізуючи отримані за методом № 2 для зразка А₂ дані, встановлено, що на хроматограмі досліджуваного екстракту без штучно внесеного Δ -9-ТГК:

- спостерігається пік досить значної інтенсивності, що відповідає за часом утримання Linoleic Acid (лінолевої кислоти);
- піка речовини, мас-спектр якої було б ідентифіковано як Dronabinol (дронабінол, тетрагідроканнабінол, ТГК, Δ -9-ТГК), у межах чутливості проведеного методу дослідження не виявлено.

Для досліджуваного екстракту зі штучно внесеною кількістю Δ -9-ТГК (зразок В₂), отриманого за методом № 2 (рисунок 2), виявлено:

- пік досить значної інтенсивності, що відповідає за часом утримання Linoleic Acid (лінолева кислота);
- пік середньої інтенсивності, що за часом утримання (RT = 5,765 хв.) відповідає речовині, мас-спектр якої ідентифіковано як Dronabinol (дронабінол, тетрагідроканнабінол, ТГК, Δ -9-ТГК).

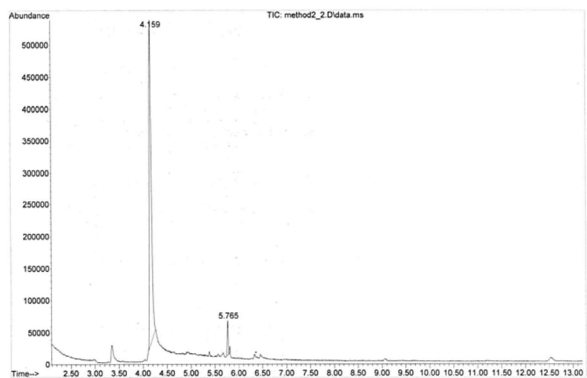


Рисунок 2 – Хроматограма, отримана при визначенні Δ -9-ТГК за методом № 2

Аналізуючи отримані за методом № 3 для зразка А₃ дані, встановлено, що на хроматограмі досліджуваного екстракту без штучно внесеного Δ -9-ТГК:

- спостерігається пік значної інтенсивності, що відповідає за часом утримання Linoleic Acid (лінолева кислота);
- спостерігаються піки середньої інтенсивності, що відповідають за часом утримання Palmitic Acid (пальмітинова кислота), Stearic Acid (стеаринова кислота), gamma-Tocopherol (γ -Токоферол), Campesterol (Кампестерол), Stigmasterol (Стігмастерол), gamma-Sitosterol (γ -Сітостерол) тощо;
- піка речовини, мас-спектр якої було б ідентифіковано як Dronabinol (дронабінол, тетрагідроканнабінол, ТГК, Δ -9-ТГК), у межах чутливості проведеного методу дослідження не виявлено.

Для досліджуваного екстракту зі штучно внесеною кількістю Δ -9-ТГК (зразок В₃), отриманого за методом № 1 (рисунок 3), виявлено:

- пік значної інтенсивності, що відповідає за часом утримання Linoleic Acid (лінолева кислота);
- піки середньої інтенсивності, що відповідають за часом утримання Palmitic Acid (пальмітинова кислота), Stearic Acid (стеаринова кислота), gamma-Tocopherol (γ -Токоферол), Campesterol (Кампестерол), Stigmasterol (Стігмастерол), gamma-Sitosterol (γ -Сітостерол) тощо;
- пік середньої інтенсивності, що за часом утримання (RT = 5,770 хв.) відповідає речовині, мас-спектр якої ідентифіковано як Dronabinol (дронабінол, тетрагідроканнабінол, ТГК, Δ -9-ТГК).

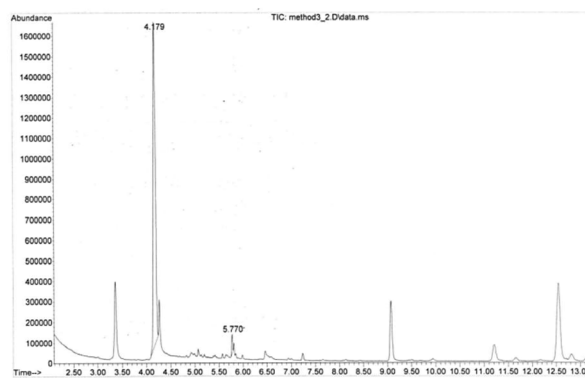


Рисунок 3 – Хроматограма, отримана при визначенні Δ -9-ТГК за методом № 3

Аналізуючи отримані за методом № 4 для зразка А₄ дані, встановлено, що на хроматограмі досліджуваного екстракту без штучно внесеного Δ -9-ТГК:

- спостерігається пік значної інтенсивності, що відповідає за часом утримання Linoleic Acid (лінолева кислота);

- спостерігаються піки середньої інтенсивності, що відповідають за часом утримання Palmitic Acid (пальмітинова кислота), Stearic Acid (стеаринова кислота), gamma-Tocopherol (γ -Токоферол), Campesterol (Кампестерол), Stigmasterol (Стігмастерол) gamma-Sitosterol (γ -Сітостерол) тощо;

- піка речовини, мас-спектр якої було б ідентифіковано як Dronabinol (дронабінол, тетрагідроканнабінол, ТГК, Δ -9-ТГК), у межах чутливості проведеного методу дослідження не виявлено.

Для досліджуваного екстракту зі штучно внесеною кількістю Δ -9-ТГК (зразок В₄), отриманого за методом № 4 (рисунок 4), виявлено:

- пік значної інтенсивності, що відповідає за часом утримання Linoleic Acid (лінолева кислота);

- піки середньої інтенсивності, що відповідають за часом утримання Palmitic Acid (пальмітинова кислота), Stearic Acid (стеаринова кислота), gamma-Tocopherol (γ -Токоферол), Campesterol (Кампестерол), Stigmasterol (Стігмастерол) gamma-Sitosterol (γ -Сітостерол) тощо;

- пік середньої інтенсивності, що за часом утримання (RT = 5,775 хв.) відповідає речовині, мас-спектр якої ідентифіковано як Dronabinol (дронабінол, тетрагідроканнабінол, ТГК, Δ -9-ТГК).

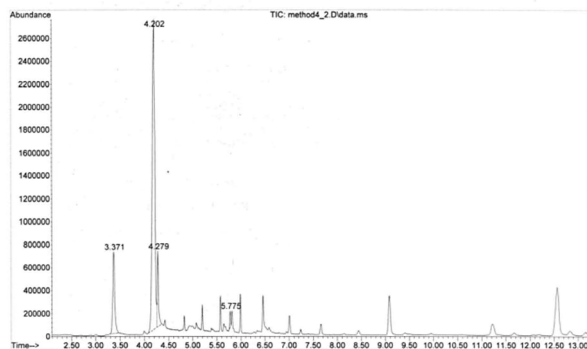


Рисунок 4 – Хроматограма, отримана при визначенні Δ -9-ТГК за методом № 4

Авторами роботи було розроблено та апробовано методики пробопідготовки та екстракції, які є придатними для виявлення Δ -9-ТГК в незначних кількостях, насамперед у насінні конопель. Як видно з отриманих хроматограм, методика із застосуванням як екстрагента ацетонітрилу з наступним промиванням гексаном (метод № 2) найбільше відповідає поставленій меті дослідження, а саме виявленню Δ -9-ТГК в незначних кількостях, насамперед у насінні конопель. Зазначений метод екстракції є ефективнішим порівняно з методами 1, 3 й 4 для застосування у зв'язку з найменшою кількістю коекстрактивних речовин, виявлених на хроматограмі, насамперед жирів та продуктів гідролізу жирів, зокрема вищих карбонових кислот (насичених і ненасичених), які можуть завадити дослідженню.

Висновки. В результаті проведення комплексу експериментальних досліджень з пошуку ефективної методики якісного виявлення Δ -9-ТГК в конопляному насінні методом рідинно-рідинної екстракції було встановлено, що всі чотири методи рідинно-рідинної екстракції загалом придатні для виявлення Δ -9-ТГК в насінні конопель, а також характеризуються приблизно однаковою чутливістю до визначення Δ -9-ТГК в незначних концентраціях.

Дослідженнями також було доведено, що кожний метод відрізняється за кількістю коекстрактивних речовин, виявлених на хроматограмі, насамперед жирів та продуктів гідролізу жирів, зокрема вищих карбонових кислот (насичених і ненасичених).

Встановлено, що серед усіх чотирьох проведених методів пробопідготовки (екстракції) для виявлення Δ -9-ТГК метод № 2 є найефективнішим, легко відтворюваним та повністю відповідає меті дослідження у зв'язку з найменшою кількістю коекстрактивних речовин, виявлених на хроматограмі.

Доведено, що метод № 2 може бути рекомендованим для якісного визначення Δ -9-ТГК в незначних концентраціях, у тому числі для його визначення у насінні конопель.

Результати проведених досліджень можуть бути використані для якісного й кількісного визначення Δ -9-ТГК як у насінні, так і в продуктах харчування, виготовлених з насіння конопель.

Умовою цього є подальше дослідження з метою визначення межі детектування Δ -9-ТГК

(LOD) та межі кількісного виявлення Δ -9-ТГК (LOQ), що необхідно для подальшої сертифікації зазначеної продукції та її експорту.

Список використаних джерел

- [1] O. Aizpurua-Olaizola et al., "Evolution of the Cannabinoid and Terpene content during the growth of Cannabis sativa plants from different chemotypes", *Journal of Natural Products*, vol. 79, no. 2, pp. 324-331, 1964. doi: 10.1021/acs.jnatprod.5b00949.
- [2] R. G. Pertwee, "Pharmacological and therapeutic targets for Δ^9 -tetrahydro-cannabinol and cannabidiol", *Euphytica*, vol. 140, no. 1-2, pp. 73-82, 2004. doi: 10.1007/s10681-004-4756-9.
- [3] М. Д. Мигаль, І. Л. Кмець, та І. М. Лайко, *Трихоми і канабіноїди конопель. До теорії селекції ненаркотичних сортів: монографія*. Суми: ФОП Щербина І.В., 2017.
- [4] С. В. Шкурдода, В. В. Пасічник, та К. П. Король, *Якісне та кількісне визначення канабіноїдів у частинах рослин конопель методом хромато-мас-спектрометрії*. Київ: ДНДЕКЦ МВС України, 2019.
- [5] Г. Бойко, Г. Тіхосова, та А. Кутасов, "Технічні коноплі: Перспективи розвитку в Україні", *Товари і ринки*, № 1, с. 110-120, 2018.
- [6] В. Г. Вировець та ін. *Коноплі: монографія*. Суми: Еллада, 2011.
- [7] Qingling Wang, and Youling L. Xiong, "Processing, nutrition, and functionality of hempseed protein: A review", *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, pp. 936-952, 2019.
- [8] Н. А. Сова, "Технологія комплексної переробки насіння промислових конопель", автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.18.02 "Технологія зернових, бобових, круп'яних продуктів і комбікормів, олійних і луб'яних культур", Херсон, 2019.
- [9] J. C. Callaway, "Hempseed as a nutritional resource: An overview", *Euphytica*, no. 140, pp. 65-72, 2004.
- [10] J. D. House, J. Neufeld, and G. Leson, "Evaluating the quality of protein from hemp seed (*Cannabis sativa* L.) products through the use of the protein digestibility-corrected amino acid score method", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, no. 58, pp. 11801-11807, 2010.
- [11] R. Russo, and R. Reggiani, "Variability in antinutritional compounds in hempseed meal of Italian and French varieties", *Plant*, no. 1, pp. 25-29, 2013.
- [12] L. Lehmann, F. Sager, and R. Brenneisen, "Excretion of cannabinoids in urine after ingestion of cannabis seed oil", *Journal of analytical toxicology*, no. 21, pp. 373-375, 1997.
- [13] N. Fortner et al., "Marijuana-positive urine test results from consumption of hemp seeds in food products", *Journal of analytical toxicology*, no. 21, pp. 476-481, 1997. doi: 10.1093/jat/21.6.476.
- [14] R. E. Struempfer, G. Nelson, and F. M. Urry, "A positive cannabinoids workplace drug test following the ingestion of commercially available hemp seed oil", *Journal of analytical toxicology*, no. 21, pp. 283-285, 1997. doi: 10.1093/jat/21.4.283.
- [15] M. H. Justin et al., " Δ 9-tetrahydrocannabinol content of commercially available hemp products", *Journal of Analytical Toxicology*, no. 32, pp. 428-432, 2008.
- [16] G. M. Patwardan, M. D. Pundlik, and S. K. Meghal, "Dunnschichtchromatographischer Nachweis von Haschischwirkstoffen in cannabis samen" ("A thin layer chromatographic method for the detection of resins in cannabis seeds"), *Arch. Kriminol.*, no. 159, pp. 36-39, 1997.
- [17] M. J. De Faubert Maunier, "A comparative evaluation of the delta-9-tetrahydrocannabinol content of cannabis plants", *Journal of the Association of Public Analysts*, no. 8, pp. 42-47, 1970.
- [18] T. Matsunaga, H. Nagatomo, I. Yamamoto, and I. Yoshimura, "Identification and determination of cannabinoids in commercially available cannabis seeds", *Eisei Kagaku*, no. 36, pp. 545-547, 1990.
- [19] G. M. Patwardan, M. D. Pundlik, and S. K. Meghal, "Gas-chromatographic detection of resins in cannabis seeds", *Indian J. Pharm. Sci.*, no. 40, pp. 166-167, 1978.
- [20] P. S. Fetterman, E. S. Keith, and C. W. Waller, "Mississippi-grown Cannabis sativa L.: Preliminary observation on chemical definition of phenotype and variations in tetrahydrocannabinol content versus age, sex, and plant part", *J. Pharm. Sci.*, no. 70, pp. 1246-1249, 1971.
- [21] T. Matsunaga, H. Nagatomo, I. Yamamoto, and H. Yoshimura, "Qualitative and quanti-

- tative analysis of cannabinoids in cannabis seeds", *Hochudohu*, no. 8, pp. 88-89, 1990.
- [22] H. Mollenken, and H. Husmann, "Cannabinoid in seed extracts of Cannabis sativa cultivars", *J. Int. Hemp Assoc.*, no. 4, pp. 73-79, 1997.
- [23] Samir A. Ross, Zlatko Mehmedic, Timothy P. Murphy, and Mahmoud A. ElSohly, "GC-MS analysis of the total Ag-THC content of both drug- and fiber-type Cannabis seeds", *Journal of Analytical Toxicology*, no. 24, pp. 715-717, 2000.
- [24] Кабінет Міністрів України (2000, трав. 06). *Постанова № 770, Про затвердження переліку наркотичних засобів, психотропних речовин і прекурсорів*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/770-2000-%D0%BF#Text>.
- ### References
- [1] O. Aizpurua-Olaizola et al., "Evolution of the Cannabinoid and Terpene content during the growth of Cannabis sativa plants from different chemotypes", *Journal of Natural Products*, vol. 79, no. 2, pp. 324-331, 1964.
doi: 10.1021/acs.jnatprod.5b00949.
- [2] R. G. Pertwee, "Pharmacological and therapeutic targets for Δ^9 -tetrahydro-cannabinol and cannabidiol", *Euphytica*, vol. 140, no. 1-2, pp. 73-82, 2004.
doi: 10.1007/s10681-004-4756-9.
- [3] M. D. Myhal, I. L. Kmets, and I. M. Laiko, *Trichomes and cannabinoids of hemp. To the theory of selection of non-narcotic varieties*: monograph. Sumy: FOP Shcher-byna I.V., 2017 [in Ukrainian].
- [4] S. V. Shkurdoda, V. V. Pasichnyk, and K. P. Korol, *Qualitative and quantitative determination of cannabinoids in parts of cannabis plants by chromato-mass spectrometry*. Kyiv: DNDEKTs MVS Ukrainy, 2019 [in Ukrainian].
- [5] H. Boiko, H. Tikhosova, and A. Kutasov, "Technical hemp: Prospects for development in Ukraine", *Tovary i rynky*, no. 1, pp. 110-120, 2018 [in Ukrainian].
- [6] V. H. Vyrovets et al., *Hemp*: monograph. Sumy: Ellada, 2011. [in Ukrainian].
- [7] Qingling Wang, and Youling L. Xiong, "Processing, nutrition, and functionality of hempseed protein: A review", *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, pp. 936-952, 2019.
- [8] N. A. Sova, "Technology of complex processing of industrial hemp seeds", Ph.D. abstract: spec. 05.18.02 "Technology of cereals, legumes, cereals and animal feeds, oilseeds and bast crops", Kherson, 2019 [in Ukrainian].
- [9] J. C. Callaway, "Hempseed as a nutritional resource: An overview", *Euphytica*, no. 140, pp. 65-72, 2004.
- [10] J. D. House, J. Neufeld, and G. Leson, "Evaluating the quality of protein from hemp seed (Cannabis sativa L.) products through the use of the protein digestibility-corrected aminoacid score method", *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, no. 58, pp. 11801-11807, 2010.
- [11] R. Russo, and R. Reggiani, "Variability in antinutritional compounds in hempseed meal of Italian and French varieties", *Plant*, no. 1, pp. 25-29, 2013.
- [12] L. Lehmann, F. Sager, and R. Brenneisen, "Excretion of cannabinoids in urine after ingestion of cannabis seed oil", *Journal of analytical toxicology*, no. 21, pp. 373-375, 1997.
- [13] N. Fortner et al., "Marijuana-positive urine test results from consumption of hemp seeds in food products", *Journal of analytical toxicology*, no. 21, pp. 476-481, 1997.
doi: 10.1093/jat/21.6.476.
- [14] R. E. Struempfer, G. Nelson, and F. M. Urry, "A positive cannabinoids workplace drug test following the ingestion of commercially available hemp seed oil", *Journal of analytical toxicology*, no. 21, pp. 283-285, 1997.
doi: 10.1093/jat/21.4.283.
- [15] M. H. Justin et al., " Δ^9 -tetrahydrocannabinol content of commercially available hemp products", *Journal of Analytical Toxicology*, no. 32, pp. 428-432, 2008.
- [16] G. M. Patwardan, M. D. Pundlik, and S. K. Meghal, "Dunnschichtchromatographischer Nachweis von Haschischwirkstoffen in cannabis samen" ("A thin layer chromatographic method for the detection of resins in cannabis seeds"), *Arch. Kriminol.*, no. 159, pp. 36-39, 1997.
- [17] M. J. De Faubert Maunder, "A comparative evaluation of the delta-9-tetrahydrocannabinol content of cannabis plants", *Journal of the Association of Public Analysts*, no. 8, pp. 42-47, 1970.

- [18] T. Matsunaga, H. Nagatomo, I. Yamamoto, and I. Yoshimura, "Identification and determination of cannabinoids in commercially available cannabis seeds", *Eisei Kagaku*, no. 36, pp. 545-547, 1990.
- [19] G. M. Patwardan, M. D. Pundlik, and S. K. Meghal, "Gas-chromatographic detection of resins in cannabis seeds", *Indian J. Pharm. Sci.*, no. 40, pp. 166-167, 1978.
- [20] P. S. Fetterman, E. S. Keith, and C. W. Waller, "Mississippi-grown Cannabis sativa L.: Preliminary observation on chemical definition of phenotype and variations in tetrahydrocannabinol content versus age, sex, and plant part", *J. Pharm. Sci.*, no. 70, pp. 1246-1249, 1971.
- [21] T. Matsunaga, H. Nagatomo, I. Yamamoto, and H. Yoshimura, "Qualitative and quantitative analysis of cannabinoids in cannabis seeds", *Hochudohu*, no. 8, pp. 88-89, 1990.
- [22] H. Mollenken, and H. Husmann, "Cannabinoid in seed extracts of Cannabis sativa cultivars", *J. Int. Hemp Assoc.*, no. 4, pp. 73-79, 1997.
- [23] Samir A. Ross, Zlatko Mehmedic, Timothy P. Murphy, and Mahmoud A. ElSohly, "GC-MS analysis of the total Ag-THC content of both drug- and fiber-type Cannabis seeds", *Journal of Analytical Toxicology*, no. 24, pp. 715-717, 2000.
- [24] Cabinet of Ministers of Ukraine (2000, May 06). *Resolution no. 770, On approval of the list of narcotic drugs, psychotropic substances and precursors*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/770-2000-%D0%BF#Text>.

S. V. Shkurdoda¹, head of the research department of materials, substances and products,
e-mail: sergeyshkur@yahoo.com

T. V. Solodovnik², Ph.D., associate professor,
e-mail: solodovniktetana@gmail.com

V. V. Pasichnyk¹, deputy head of the research sector,

K. P. Korol¹, head of the research sector,

D. Yu. Shynkarenko¹, chief forensic expert

¹Cherkasy Research Forensic Center of the MIA of Ukraine
Pasterivska st, 104, Cherkasy, 18000, Ukraine

²Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

METHODS FOR DETERMINATION OF Δ 9-TETRAHYDROCANNABINOL CONTENT IN SEEDS OF HEMP BY GAS CHROMATOGRAPHY METHOD: ANALYSIS AND SCIENTIFIC JUSTIFICATION

Cannabis (Cannabis sativa L) has been an important part of the well-being of the population for many centuries. This plant is a bast and oilseed crop that is characterized by specific biological and unique consumer properties. However, hemp plants also have medicinal and narcotic properties. Cannabis plants can excrete secretions that contain cannabinoids. The psychotropic effect of the narcotic drug cannabis is the result of the complex action of all cannabinoids, although only some of them have a psychotropic effect in its pure form. These include, first, delta-9-tetrahydrocannabinol (Δ -9-THC), which has a major psychotropic effect and is able to selectively bind to cannabinoid receptors in certain brain structures. In this regard, the development of simple and effective methods of detection (Δ -9-THC) in hemp plant seeds is an urgent issue.

The article considers the analysis of existing methods of liquid-liquid extraction of Δ -9-THC from hemp seeds with their subsequent approbation and improvement for separation of interfering fractions, first of all fats (oils), and with the subsequent identification of Δ -9-THC by gas chromatography-mass spectrometry with mass-selective detection. Some methods of liquid-liquid extraction of hemp seeds and comparison of the obtained results are given. To solve this goal, seeds collected from technical hemp of the Glyana variety, cultivated from plants of the genus of hemp for industrial purposes, allowed by the legislation of Ukraine, are collected from varieties of hemp plants in dried straw whose content of Δ -9-THC does not exceed 0.08 percent. It has been found that the method with the use of acetonitrile as an extracting, followed by washing with hexane, most meets the goal of the study,

namely to detect Δ -9-THC in small quantities, especially in hemp seeds. This method of extraction is best suited due to the lowest amount of co-extractives found on the chromatogram, primarily fats and fat hydrolysis products, namely higher carboxylic acids (saturated and unsaturated), which may interfere with the study. These studies can be further used to quantify Δ -9-THC in hemp seeds and foods made from hemp seeds, followed by the detection limit (LOD) and the limit of quantification (LOQ) of the substance, which is necessary for further certification of these products and exports. The obtained research results allow to determine the presence of Δ -9-THC in hemp seeds and food products made from hemp seeds.

Keywords: Δ 9-THC, technical hemp, hemp seeds, cannabinoids, extraction, gas chromato-mass spectrometry.