

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

ЧЕРКАСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Технічні науки
Заснований у грудні 1996 р.

1/2022

Редакційна колегія:

Al-Azzeh J., д-р філософії, доцент (Йорданія)
Антонюк В. С., д-р техн. наук, професор
Артемчук В.О., д-р техн. наук, с.н.с.
Базіло К. В., д-р техн. наук, професор
Батраченко О. В., д-р техн. наук, доцент
Бондаренко М. О., д-р техн. наук, професор
Бондаренко Ю. Ю., канд. техн. наук, професор
Вамболь В. В., д-р техн. наук, професор
Вашенко В. А., д-р техн. наук, професор
Вітенько Т. М., д-р техн. наук, професор
Вербицький С. Б., канд. техн. наук
Вязовик В. М., д-р техн. наук, доцент
Гальченко В. Я., д-р техн. наук, професор
Гевод В. С., д-р хім. наук, доцент
Зайчук О. В., д-р техн. наук, професор
Заболотній С. В., д-р техн. наук, професор
Iavich M., д-р філософії, професор (Грузія)
Kažys R. J., д-р техн. наук, професор (Литва)
Коваленко І. Л., д-р техн. наук, професор
Лобода О. А., д-р хім. наук
Лукашенко В. М., д-р техн. наук, професор
Мусієнко М. П., д-р техн. наук, професор
Осипенко В. І., д-р техн. наук, професор
Палагін В. В., д-р техн. наук, професор
Півоваров О. А., д-р техн. наук, професор
Плахотний О. П., д-р техн. наук, доцент
Прокопенко Т. О., д-р техн. наук, професор
Ситник О. О., д-р техн. наук, професор
Скиба М. І., канд. техн. наук, доцент
Смотраєв Р. В., канд. техн. наук, доцент
Столяренко Г. С., д-р техн. наук, професор
Сухенко В. Ю., д-р техн. наук, професор
Уткіна Т. Ю., канд. техн. наук, доцент
Фауре Е. В., д-р техн. наук, професор (*гол. ред.*)
Федоров Є. Є., д-р техн. наук, професор
Фролова Л. А., д-р техн. наук, професор
Хоменко О. М., канд. хім. наук, доцент
Яценко І. В., д-р техн. наук, професор

ЗАСНОВНИК І ВИДАВЕЦЬ – Черкаський
державний технологічний університет

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

Виходить 4 рази на рік

У ВИПУСКУ:

- ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
- АВТОМАТИЗАЦІЯ
ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ
- ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ІНЖЕНЕРІЯ,
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

Редакційна рада видання:

Григор О. О., д-р політ. наук, професор,
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 науково-дослідної роботи
і міжнародних зв'язків ЧДТУ;
Столяренко Г. С., д-р техн. наук, професор;
Литвин О. В., нач. ред.-видав. відділу ЧДТУ

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•2022

ВІСНИК

**Черкаського державного
технологічного університету**

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

VISNYK

**Cherkaskogo derzhavnogo
tehnologichnogo universitetu**

TECHNICAL SCIENCE

1 • 2022

**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,
Open Ukrainian Citation Index

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

Затверджено Вченою радою
Черкаського державного
технологічного університету,
протокол № 14 від 18.04.2022.

За повного або часткового
передрукування матеріалів
посилання на «Вісник Черкаського
державного технологічного
університету» є обов'язковим.

ЗМІСТ

Тарасенко Я. В., Бабенко В. Г. Метод комп'ютеризованого модифікування англомовного тексту на основі психосемантичних властивостей	4
Уткіна Т. Ю., Рябцев В. Г. Імплементация у ПЛІС нейрообчислювачів для розпізнавання стану розвитку ембріонів пташенят курей	13
Захарченко В. Д., Добролюбова М. В., Стаценко О. В., Шевченко К. Л. Оцінка похибок при експериментальному дослідженні параметрів асинхронних двигунів	24
Онищук О. О. Оптимізований розрахунок адсорбційного процесу через насадковий адсорбер методом коміркової моделі.....	37
Ящук Л. Б. Можливості розрахункових методів моніторингу при визначенні екологічної доцільності в організації міських транспортних потоків.....	47

CONTENTS

Tarasenko Ya. V., Babenko V. H. Method for computerized modification of English text based on psychosemantic properties	4
Utkina T. Yu., Ryabtsev V. G. FPGA implementation of neurocomputers to recognize the state of development of chicken embryos	13
Zakharchenko V. D., Dobrolyubova M. V., Statsenko O. V., Shevchenko K. L. Estimation of errors in experimental study of induction motor parameters	24
Onyschuk O. O. Optimized calculation of adsorption process through the nozzle adsorber by the cell model method	37
Yashchuk L. B. Possibilities of calculation monitoring methods in determining ecological expediency in the organization of municipal transport flows.....	47

УДК 004.056

[0000-0002-5902-8628] **Я. В. Тарасенко**, канд. техн. наук,
e-mail: yaroslav.tarasenko93@gmail.com
[0000-0003-2039-2841] **В. Г. Бабенко**, д-р техн. наук, доцент
e-mail: v.babenko@chdtu.edu.ua
Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

МЕТОД КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОГО МОДИФІКУВАННЯ АНГЛОМОВНОГО ТЕКСТУ НА ОСНОВІ ПСИХОСЕМАНТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

У статті досліджено можливість використання психосемантичних властивостей з метою захисту текстової інформації з обмеженим доступом. Розроблений метод комп'ютеризованого модифікування англomовного тексту дозволяє підвищити ефективність запобігання незаконному розповсюдженню та використанню текстової інформації порівняно з методами, які не враховують психосемантичну складову. Це дає змогу захистити модифіковані семантично неподільні елементи від можливості їх спотворення чи видалення, враховуючи загрозу потенційних інформаційних впливів. Проведено моделювання процесу автоматизованого модифікування англomовних текстів за допомогою комп'ютерних засобів. Результати порівняння з аналогічними підходами дозволяють зробити попередні висновки про вищу ефективність під час роботи з текстами середнього та високого об'єму. Отримані експериментальні дані також дають можливість визначити стійкість модифікованих за допомогою розробленого методу текстів до застосування спеціалізованих засобів семантичного видалення наявних маркерів.

Ключові слова: комп'ютеризована модифікація тексту, психосемантичні властивості, семантично неподільна складова, інформація з обмеженим доступом, квантово-семантичний аналіз, суб'єктивне сприйняття семантики.

Вступ. Сьогодні країна стикається з викликами та загрозами інформаційній безпеці, вирішення яких вкрай необхідне як для держави, так і для інших країн-партнерів. Згідно зі Стратегією інформаційної безпеки [1], з одного боку, існування ефективної системи захисту і протидії нанесенню шкоди через поширення негативних інформаційних впливів, до яких відносяться деструктивна пропаганда, несанкціоноване розповсюдження, використання та порушення цілісності інформації з обмеженим доступом, є необхідною умовою інформаційної безпеки України. З другого боку, аналіз загроз та викликів інформаційній безпеці доводить, що застосування технологій інформаційного протидіювання проти України також має вплив і на інші держави, а отже, як висновок, розгляд саме англomовного тексту дозволить нівелювати шкідливі наслідки як проти України, так і проти інших держав.

Інсайдерські атаки на інформацію з обмеженим доступом, зокрема на текстову інформацію, спричинили втрати в середньому \$11,45 млн. за 12 місяців станом на 2020 р. за даними незалежного дослідження Ponemon

Institute [2]. Звідси випливає необхідність розробки комп'ютерних інформаційних систем, здатних швидко та ефективно протидіяти подібним загрозам. Існує необхідність вдосконалення систем електронно-цифрового підпису та базових методів, що лежать в основі методології створення DLP (Data Loss Prevention) систем. Зокрема, задача накладання цифрових водяних знаків (ЦВЗ) на текстову інформацію потребує вдосконалення для підвищення стійкості подібних міток. Психосемантичні методи дозволяють підвищити надійність вбудовування ЦВЗ у текст шляхом його модифікації. Звідси випливає задача створення методу комп'ютеризованого модифікування англomовного тексту на основі психосемантичних властивостей, який зможе підвищити рівень захисту інформації з обмеженим доступом і може бути використаний в інформаційному протидіюванні для забезпечення інформаційної безпеки держави.

Аналіз літератури показав наявність значної кількості методів генерації текстів [3-5], однак недостатню кількість методів модифікації вже існуючих текстів [6-7], що зумов-

лює потребу в подібних методах. Крім того, базові підходи, застосовані в існуючих методах генерації тексту хоч і можуть бути використані для вирішення окремих завдань модифікації тексту, однак повною мірою не можуть задовольнити усі потреби в методологічному апараті. В той же час існуючі методи модифікації не враховують психосемантичних особливостей автора тексту, що унеможливає їх використання в поточному контексті. При цьому в розробці методу, якому присвячена стаття, корисним буде використання методу розрахунку когерентності [8] і попередніх розробок за основною тематикою [9-12] як методологічного базису для вирішення поставленої задачі, адже необхідність урахування аспекту модифікації тексту разом із генерацією також зумовлює актуальність дослідження.

Мета дослідження полягає у підвищенні ефективності запобігання незаконному розповсюдженню та використанню інформації з обмеженим доступом шляхом вдосконалення методологічної основи, враховуючи протидію інформаційним впливам.

В роботі ставляться наступні **задачі дослідження**:

1. Визначення імовірності успішного модифікування семантично неподільної складової.
2. Модифікація семантично неподільних складових за психосемантичними властивостями.
3. Забезпечення контекстуальної єдності модифікованої семантично неподільної складової.

Для визначення можливості модифікування неподільної семантичної складової, отриманої завдяки методу її виявлення та збереження [11], пропонується використання теорії конгруентності Озгуда і Танненбаума [13] із застосуванням методу додавання семантичного шуму [12]. Для модифікації тексту використовується психолінгвістичний профіль, сформований за методом квантово-семантичного психолінгвістичного аналізу англомовного тексту [10]. Метод комп'ютерного формування англомовного тексту відповідно до психолінгвістичного профілю [9] виступає основою для проведення маніпуляцій із семантикою тексту. З метою забезпечення контекстуальної єдності модифікованих частин, вдосконалюється метод розрахунку конгруентності тексту [8], для чого застосовується визна-

чення семантичного диференціалу із вдосконаленням в [14] методом факторіального аналізу. Аналіз надійності здійснювався із застосуванням методу семантичного стиснення текстової інформації [15].

Виклад основного матеріалу. Виходячи з того, що в дослідженні отримали подальший розвиток раніше розроблені методи і вже отримані результати члена авторського колективу статті, доцільно надати базові визначення для правильного розуміння використаних понять.

Темою в цьому випадку виступає структурно-семантичний функціональний блок, виражений лексико-семантичними засобами, що несе в собі відбиток відомої інформації.

Ремою виступає блок, який несе в собі відбиток невідомої інформації.

Диремою виступає функціональний блок, в якому частина інформації є вже відомою, а інша частина ще невідомою.

Психосемантичні властивості характеризують індивідуальне семантичне сприйняття та ставлення суб'єкта і базуються на його категоріальному апараті сприйняття об'єктивної дійсності.

Конгруентність передбачає встановлення балансу ставлення суб'єкта до об'єкта мовлення.

Семантичним шумом можна назвати ті смислові елементи, які не впливають на об'єктивне сприйняття основної теми та підтем тексту.

Світ сприйняття виступає окремою властивістю для аналізу семантичних структур з погляду їх можливого сприйняття суб'єктом.

Визначення можливості модифікування семантично неподільної складової. Базуючись на даних, отриманих в [11], використовуючи комп'ютерну інформаційну систему, можна визначити тему та рему англомовного тексту, а сума рем та дирем виступає неподільною семантичною складовою. Модифікація саме неподільної семантичної складової дозволить забезпечити цілісність даних та підвищити ефективність процедури модифікації тексту в напрямі захисту модифікованих семантичних елементів від видалення чи повторної зміни, що спричинить спотворення маркера. Крім цього, захист маркера від спотворення в результаті можливого відтворення тексту зловмисником по пам'яті можуть забезпечити лише семантичні одиниці, а ні в якому разі не лексичні, які легко замінити без втрати основного смислового навантаження тексту.

Виходячи з результатів дослідження [11] та виведеної формули для визначення множини збережених рем R^* , можна отримати суму рем та дирем, яка становить неподільну семантичну складову, враховуючи маркер психолінгвістичного портрету зловмисника. Однак цього недостатньо для подальшої модифікації тексту у зв'язку з необхідністю визначення можливості модифікації визначеної неподільної семантичної складової шляхом обрахунку імовірності успішної модифікації на основі психосемантичних властивостей зловмисника. Базуючись на теорії конгруентності Озгуда і Танненбаума [13] і результатах застосування теорії в методі додавання семантичного шуму за індивідуальною семантичною лінією пропагандиста [12], можна адап-

тувати методику для визначення імовірності успішного модифікування неподільної семантичної складової англomовного тексту. Перш за все, обраховується негентропія неподільної семантичної частки:

$$H(R^*) = - \sum_{i=1}^m P(R^*) \cdot \log_2 \frac{1}{P(R^*)} \quad (1)$$

де R^* – неподільна семантична складова.

Негентропія є необхідною умовою визначення рівня впорядкованості неподільних семантичних складових.

Таким чином, повна імовірність події, що неподільну семантичну складову можна модифікувати, обчислюється за формулою

$$P(R_{\text{mod}}^*) = \sum_{i=1}^n P([C \text{ to } H(R^i)] \rightarrow 0) \cdot P(R_{\text{mod}}^* | [C \text{ to } H(R^i)] \rightarrow 0), \quad (2)$$

де $C \text{ to } H(R^i)$ – зміна ставлення особи, психосемантичні властивості якої використовуються до неподільної семантичної складової. В ідеальному випадку зміна ставлення повинна дорівнювати нулю, однак обираються лише ті неподільні семантичні складові, які максимально наближені до нуля. При цьому зміна ставлення до неподільної семантичної складової може бути обчислена за рівнянням

$$C \text{ to } H(R^*) = \begin{cases} C \text{ to } H(R^*) = \frac{H(R^*)}{H(R^*) + |H(R_{\text{mod}}^*)|} \cdot p' \\ C \text{ to } H(R_{\text{mod}}^*) = \frac{|H(R_{\text{mod}}^*)|}{H(R^*) + |H(R_{\text{mod}}^*)|} \cdot p' \end{cases} \quad (3)$$

де $C \text{ to } H(R_{\text{mod}}^*)$ – зміна ставлення до модифікованої неподільної семантичної складової, p' – величина сумарної зміни ставлення.

Процедура комп'ютерного модифікування англomовного тексту. Визначивши потенційну можливість модифікації семантично неподільної складової тексту, необхідно провести зміни на рівні сприйняття. При цьому, за аналогією з односторонньою функцією, потенційно неможливо дізнатись, яка саме семантична складова була модифікована, навіть використавши той самий підхід визначення теми-реми та потенційних одиниць для модифікації. Це досягається за рахунок використання стеганографічного протоколу вбудовування ЦВЗ у текст на основі приватного

ключа, яким і виступає сформований психолінгвістичний портрет конкретної особи (в цьому контексті зловмисника). Для вирішення поставлених у статті задач не є необхідною розробка стеганографічного протоколу. Наразі важливо сформулювати методологічний апарат для його подальшого вбудовування в готовий текст, на що і розрахований пропонований метод модифікування.

Модифікування тексту шляхом модифікації його семантично неподільних складових можливе, спираючись на психосемантичні властивості, зокрема на категоріальний апарат зловмисника та його психолінгвістичний профіль, визначений за допомогою методу квантово-семантичного психолінгвістичного аналізу англomовного тексту [10] із використанням методу комп'ютерного формування англomовного тексту відповідно до психолінгвістичного профілю [9]. Водночас адаптація методу [11] до квантово-семантичного аналізу дозволяє значно підвищити синергію цих методів і, як результат, підвищити ефективність модифікування тексту.

Таким чином, за формулою (4) можна сформулювати семантично однорідний необхідний фрагмент тексту, яким варто замінити існуючу в тексті неподільну семантичну складову:

$$R_{\text{mod}} = \lambda \hat{P} R^* [H(R^*)(\hat{P} R^*)(f(x')dx)], \quad (4)$$

де $\hat{P}$ – оператор перестановки, $f(x')dx$ – функція, що описує суб'єктивну семантичну лі-

нію, λ – множник, який відрізняє сприйняття модифікованої семантичної лінії від суб'єктивної.

В свою чергу, формула (5) описує процес модифікування англomовного тексту на основі психосемантичних властивостей:

$$T_{\text{mod}} = \frac{\prod_{k=1}^n (R^*)_k}{\prod_{k=1}^m (R_{\text{mod}}^{S'_{1_n}})_k} + \prod_{k=1}^m (R_{\text{mod}}^{S'_{1_e}})_k, \quad (5)$$

де S'_{1_n} – множина синонімічних лексико-семантичних конструкцій, характерних для психолінгвістичного профілю та розподілених на e елементів, які відповідають категоріальним одиницям демографічного профілю.

Забезпечення контекстуальної єдності семантично неподільної складової, враховуючи психосемантичні властивості. Зміни найбільш вдалих елементів недостатньо для повноцінного модифікування тексту в комплексі, оскільки зростає ризик виявлення модифікованого фрагмента. Для підвищення ефективності та надійності процедури модифікації необхідно врахувати контекстуальну залежність і звернути увагу на психосемантичні властивості автора. Це дозволяє зробити модифікований під задачі дослідження метод розрахунку когерентності тексту [8]. Щоб вдосконалити метод, необхідно враховувати

психосемантичні властивості шляхом визначення семантичного диференціалу, в основі процесу визначення якого лежить вдосконалений в [14] метод факторіального аналізу для урахування світів сприйняття семантичної частки. А той факт, що вдосконалений пошук ортогональних проєкцій дозволяє знайти і довжину вектора семантики, то представлення модифікованої семантично неподільної складової тексту у векторному вигляді дозволить зменшити кількість аспектів методу [8], які необхідно вдосконалити, та підвищити ефективність його роботи.

Таким чином, вектор модифікованого тексту набуде вигляду

$$\overline{T_{\text{mod}}} = \frac{1}{|R^*|} \sum_{k=1}^{|R^*|} \overline{(R_{\text{mod}})_k} \cdot \overline{V}, \quad (6)$$

де $\overline{V}$ – вектор класифікації, координати якого корелюють з усіма неподільними семантичними складовими, що співвідносяться з категоріальним апаратом психолінгвістичного портрету, $|R^*|$ – потужність множини усіх неподільних семантичних складових.

Пошук ортогональних проєкцій буде відбуватися за модифікованою під задачі цього дослідження формулою наступного вигляду:

$$\frac{1}{m(m-1)} \sum_{i,j=1}^m (\overline{W'}_i - \overline{(T_{\text{mod}})_j})^2 = \frac{2m^2}{m(m-1)} \frac{\left[\sum_{i=1}^{|R^*_{\text{mod}}|} P(R^*_{\text{mod}})_i \cdot \log_2 \frac{1}{P(R^*_{\text{mod}})_i} \right]}{\prod_{k=1}^m (R_{\text{mod}}^{S'_{1_e}})_k}, \quad (7)$$

де W' – вектор світів сприйняття тексту.

В іншому послідовність дій для визначення семантичного диференціалу не відрізняється від класичного алгоритму дій, модифікованого в [14]. Також наявна необхідність визначення світів сприйняття.

Процедуру оцінювання задачі вставки, описаної у [8], доцільно використовувати і для оцінювання запропонованого в статті методу. Універсальність підходу досягається завдяки адаптації методологічного апарату вдосконалюваного методу до застосування до попередніх досліджень за темою статті. Це дає змогу з максимально можливою точністю використовувати результати експериментального дослідження в роботі [8] з метою порів-

няння з попередніми експериментальними результатами моделювання роботи методу, отриманими при дослідженні запропонованого методу комп'ютеризованого модифікування англomовного тексту.

Результати досліджень. В роботі розроблено метод комп'ютеризованого модифікування англomовного тексту, що базується на психосемантичних властивостях для впровадження ЦВЗ у текст за умови його захисту від модифікації чи видалення, що дає змогу підвищити ефективність запобігання незаконному розповсюдженню та використанню інформації з обмеженим доступом шляхом впровадження маркера у семантично неподільну складову.

При цьому було вдосконалено метод розрахунку конгруентності тексту для врахування семантичних властивостей шляхом застосування модифікованого факторіального аналізу на основі визначення світів сприйняття семантичної частки.

Визначення можливості модифікування семантично неподільної складової відбувається шляхом обрахунку імовірності успішної модифікації на основі психосемантичних властивостей за рахунок застосування теорії конгруентності та результатів аналізу методу додавання семантичного шуму, що дало змогу визначити імовірність успішного модифікування тексту.

Модифікація англomовного тексту відбувається шляхом модифікації семантично неподільних складових за психосемантичними властивостями, які базуються на категоріальному апараті та психолінгвістичному профілі, що дозволило більш ефективно вбудовувати маркер у семантично неподільну складову тексту для його захисту.

Забезпечення контекстуальної єдності відбувається на основі модифікованого під задачі дослідження методу розрахунку коге-

рентності тексту на основі визначення семантичного диференціалу за рахунок вдосконаленого методу факторіального аналізу, що дозволило врахувати світи сприйняття семантичної частки і підвищити загальний рівень ефективності модифікації тексту та природності його сприйняття з метою захисту модифікованих елементів.

Для перевірки надійності та ефективності методу було обрано тестову групу осмислених текстів публіцистичного стилю об'ємом від 100 до 50 000 символів загальною кількістю 70 текстів. Вбудовування відбувалося в автоматизованому вигляді: комп'ютеризоване модифікування з мануальним формуванням ЦВЗ.

До того ж, не варто залишати без уваги надійність методу в умовах інформаційного протистояння, окрім ефективності модифікації тексту.

Таким чином, застосувавши найбільш надійний спосіб знищення надлишкової семантичної інформації – семантичне стиснення тексту за допомогою методу [15], можна визначити надійність та захищеність запропонованого методу (рисунок 1).

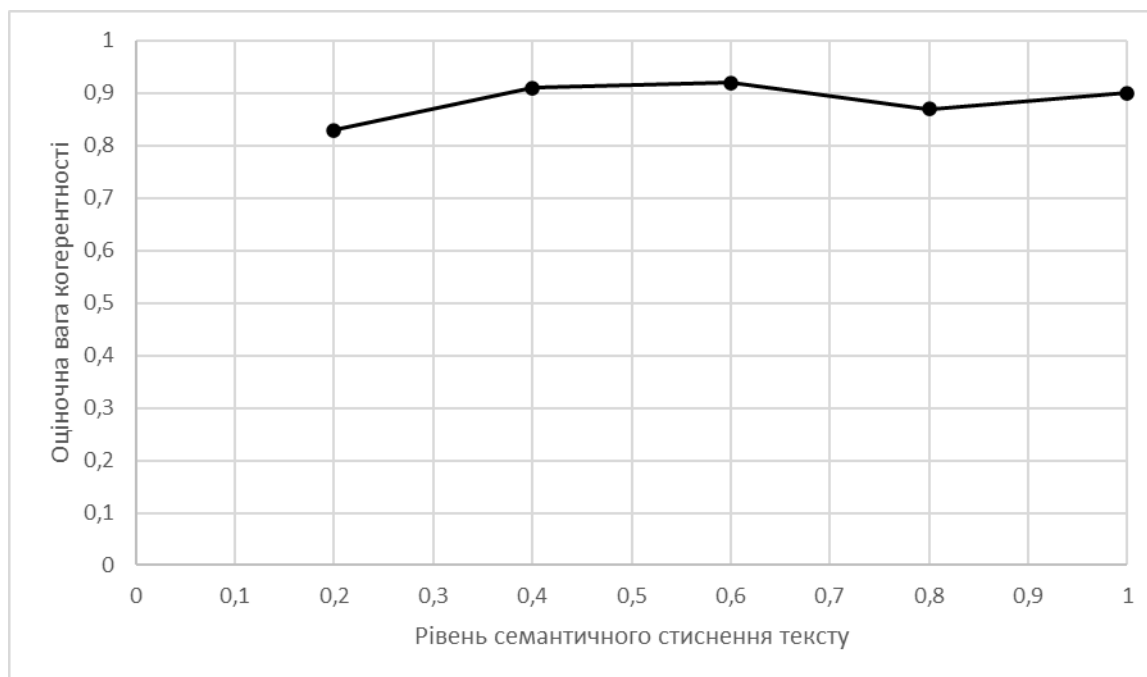


Рисунок 1 – Зміна когерентності при семантичному стисненні

Таким чином, текст стискався до значень, які в окремих випадках досягали 20% від початкового об'єму тексту. При цьому перевірялась семантична схожість модифіко-

ваних об'єктів з початковими на основі когерентності. І хоча виявлено, що при порогових значеннях у 20% схожість досягала 83% і була величиною нестабільною, на яку впливало

багато сторонніх змінних, однак загальна схожість не була нижчою за 90%. Окрім того, виявлено, що стиснення не видалило жодного модифікованого об'єкта, а це, в свою чергу, доводить ефективність приховування ЦВЗ в семантично неподільних складових, які видалити неможливо через наявність межі семантичного стиснення.

Обговорення результатів. В роботі [8] зазначаються найкращі експериментальні дані у моделі DM (distributed memory) підходу MSV (multiple similar vertex). Наведені експериментальні дані можна використати як аналог для порівняння та аналізу функціонування запропонованого в статті методу. Як видно з рисунка 2, найкращу оціночну вагу аналогічний підхід показує лише за найниж-

чого порогового значення (штрихова лінія на графіку). І хоча недоліком є той факт, що результати запропонованого методу нижчі за умови мінімального порогового значення (суцільна лінія на графіку), однак зі зростанням порогового значення зростає і ефективність методу. Це пояснюється впливом порогового значення на загальний об'єм тексту, а як відомо, зі збільшенням об'єму збільшується кількість імовірних семантично неподільних складових, які, за оцінкою, можуть бути використані для модифікації тексту за психосемантичними властивостями. При цьому для аналогічних методів збільшення об'єму означає зменшення імовірності позитивної кореляції доданого фрагмента з контекстом.

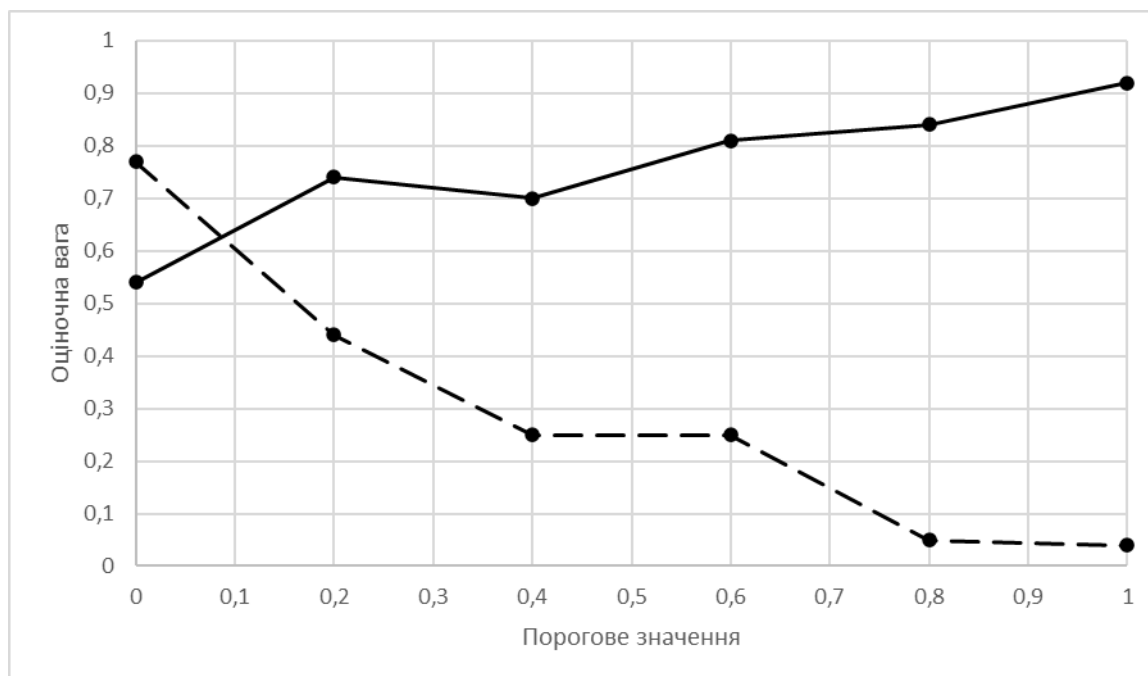


Рисунок 2 – Залежність оціночної якості модифікації тексту від порогового значення

Можна припустити, що суттєва різниця значень зумовлена різницею в підходах до аналізу української та англійської мови, застосуванні квантово-семантичного аналізу та врахуванні психосемантичних властивостей. На жаль, не відомі певні деталі проведеного у [8] експериментального дослідження, зокрема дискурсні характеристики аналізованих текстів, що не дозволяє зі стовідсотковою точністю зіставити досліджувані дані. Однак основні вимоги до експерименту були витримані, а досліджувані характеристики дозволяють мінімізувати розбіжність та забезпечити максимально можливу об'єктивність результатів.

Висновки. Наукова новизна полягає в тому, що розроблений метод комп'ютеризованого модифікування англomовного тексту дозволяє підвищити ефективність запобігання незаконному розповсюдженню та використанню інформації з обмеженим доступом шляхом впровадження маркера у семантично неподільну складову тексту та модифікації її на основі психосемантичних властивостей, що дозволило розробити методологічний апарат для впровадження ЦВЗ у текст за умови його захисту від модифікації чи видалення та врахувати протидію інформаційним впливам завдяки вдосконаленому методу розрахунку кон-

груєнтності тексту для врахування психолінгвістичного портрету зловмисника.

Метод дає змогу одночасного вирішення двох задач: захисту текстових документів та здійснення інформаційного протидиверсія за рахунок формування універсального методологічного апарату для протидії кібердиверсіям.

Порівняння з аналогічними підходами дозволяє зробити висновок про значно кращу ефективність при використанні текстів середнього та великого об'єму. Крім того, ефективність та надійність методу доводить стійкість до спеціалізованих засобів видалення чи знешкодження подібних маркерів.

Практичне значення має методологічна основа, яка може бути впроваджена як у сучасних DLP системах, так і в системах ЕЦП чи для протидії інформаційним впливам.

Подальшого дослідження потребує аналіз впливу кількості модифікованих семантично неподільних складових англомовного тексту на ставлення зловмисника до тексту зворотньої пропаганди. Результати, описані в статті, можуть бути використані при розробці стегаграфічного протоколу для вбудовування ЦВЗ у текст, враховуючи інформаційне протидиверсія.

Список використаних джерел

- [1] Указ Президента України "Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 15 жовтня 2021 року "Про Стратегію інформаційної безпеки України". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/685/2021#n7>. Дата звернення: Лют. 18, 2022.
- [2] 2020 Cost of Insider Threats Global Report, 2020. [Online]. Available: <https://www.exclusive-networks.com/uk/wp-content/uploads/sites/28/2020/12/UK-VR-Proofpoint-Report-2020-Cost-of-Insider-Threats.pdf>. Accessed on: Febr. 20, 2022.
- [3] S. Chen, J. Wang, X. Feng, F. Jiang, B. Qin, and C.-Y. Lin, "Enhancing neural data-to-text generation models with external background knowledge", in *Proc. 2019 Conf. on Empirical Methods in Natural Language Processing and 9th Int. Joint Conf. on Natural Language Processing*, Hong Kong, China, Nov. 3-7, 2019, pp. 3022-3032.
- [4] S. Welleck, K. Brantley, H. Daume III, and K. Cho, "Non-monotonic sequential text generation", in *Proc. 36th Int. Conf. on Machine Learning*, Long Beach, USA, June 10-15, 2019.
- [5] T. C. Ferreira, C. van der Lee, E. van Miltenburg, and E. Krahmer, "Neural data-to-text generation: A comparison between pipeline and end-to-end architectures", in *Proc. 2019 Conf. on Empirical Methods in Natural Language Processing and 9th Int. Joint Conf. on Natural Language Processing*, Hong Kong, China, Nov. 3-7, 2019, pp. 552-562.
- [6] Y. Yu, D. Qiu, and R. Yan, "A quantum language-inspired tree structural text representation for semantic analysis", *Mathematics*, no. 10 (6), p. 914, 2022.
- [7] S. Y. Feng, A. W. Li, and J. Hoey, "Keep calm and switch on! Preserving sentiment and fluency in semantic text exchange", in *Proc. 2019 Conf. on Empirical Methods in Natural Language Processing and 9th Int. Joint Conf. on Natural Language Processing*, Hong Kong, China, Nov. 3-7, 2019, pp. 2701-2711.
- [8] С. Д. Погорілий, та А. А. Крамов, "Метод розрахунку когерентності українського тексту", *Ресстрація, зберігання і обробка даних*, т. 20, № 4, с. 64-75, 2018.
- [9] Я. В. Тарасенко, "Метод комп'ютеризованого формування англомовного тексту відповідно до психолінгвістичного портрету пропагандиста", *Захист інформації*, т. 22, № 2, с. 66-73, 2020.
- [10] 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.
- [11] Я. В. Тарасенко, "Метод виявлення і збереження неподільної семантичної складової англомовного маніпулятивного тексту пропагандного дискурсу на основі квантового формалізму", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки*, № 1, с. 70-78, 2021.
- [12] Я. В. Тарасенко, "Метод додавання семантичного шуму за індивідуальною семантичною лінією пропагандиста", *Безпека інформації*, т. 27, № 2, с. 100-108, 2021.
- [13] C. E. Osgood, and P. H. Tannenbaum, "The principle of congruity in the prediction of attitude change", *Psychological Review*, no. 62 (1), pp. 42-55, 1955.
- [14] Я. В. Тарасенко, "Засоби оцінювання ставлення пропагандиста до тексту звор-

ротного психологічного впливу", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 78-84, 2021.

- [15] Я. В. Тарасенко, О. Б. Півень, та І. М. Федотова-Півень, "Метод семантичного стиснення текстової інформації для протидії комп'ютерній лінгвістичній стега-нографії", *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, № 3 (32), с. 68-78, 2018.

References

- [1] *Decree of the President of Ukraine "On the decision of the National Security and Defense Council of Ukraine on October 15, 2021 "About the Strategy of information security of Ukraine"*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/47/2017#Text>. Accessed on: Febr. 18, 2022 [in Ukrainian].
- [2] 2020 Cost of Insider Threats Global Report, 2020. [Online]. Available: <https://www.exclusive-networks.com/uk/wp-content/uploads/sites/28/2020/12/UK-VR-Proofpoint-Report-2020-Cost-of-Insider-Threats.pdf>. Accessed on: Febr. 20, 2022.
- [3] S. Chen, J. Wang, X. Feng, F. Jiang, B. Qin, and C.-Y. Lin, "Enhancing neural data-to-text generation models with external background knowledge", in *Proc. 2019 Conf. on Empirical Methods in Natural Language Processing and 9th Int. Joint Conf. on Natural Language Processing*, Hong Kong, China, Nov. 3-7, 2019, pp. 3022-3032.
- [4] S. Welleck, K. Brantley, H. Daume III, and K. Cho, "Non-monotonic sequential text generation", in *Proc. 36th Int. Conf. on Machine Learning*, Long Beach, USA, June 10-15, 2019.
- [5] T. C. Ferreira, C. van der Lee, E. van Miltenburg, and E. Krahmer, "Neural data-to-text generation: A comparison between pipeline and end-to-end architectures", in *Proc. 2019 Conf. on Empirical Methods in Natural Language Processing and 9th Int. Joint Conf. on Natural Language Processing*, Hong Kong, China, Nov. 3-7, 2019, pp. 552-562.
- [6] Y. Yu, D. Qiu, and R. Yan, "A quantum language-inspired tree structural text representation for semantic analysis", *Mathematics*, no. 10 (6), p. 914, 2022.
- [7] S. Y. Feng, A. W. Li, and J. Hoey, "Keep calm and switch on! Preserving sentiment and fluency in semantic text exchange", in *Proc. 2019 Conf. on Empirical Methods in Natural Language Processing and 9th Int. Joint Conf. on Natural Language Processing*, Hong Kong, China, Nov. 3-7, 2019, pp. 2701-2711.
- [8] S. D. Pogorilyy, and A. A. Kramov, "Method of the coherence evaluation of Ukrainian text", *Reiestratsiia, zberihannia i obrobka danykh*, vol. 20, no. 4, pp. 64-75, 2018 [in Ukrainian].
- [9] 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].
- [10] 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.
- [11] Ya. V. Tarasenko, "Method of detection and preservation of indivisible semantic component of English manipulative text of propaganda discourse based on quantum formalism", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu. Tekhnichni nauky*, no. 1, pp. 70-78, 2021 [in Ukrainian].
- [12] Ya. V. Tarasenko, "The method of semantic noise addition according to the propagandist's individual semantic line", *Bezpeka informatsii*, vol. 27, no. 2, pp. 100-108, 2021 [in Ukrainian].
- [13] C. E. Osgood, and P. H. Tannenbaum, "The principle of congruity in the prediction of attitude change", *Psychological Review*, no. 62 (1), pp. 42-55, 1955.
- [14] Ya. V. Tarasenko, "Means of assessing the propagandist's attitude to the text of the reverse psychological influence", *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu*, no. 4, pp. 78-84, 2021 [in Ukrainian].
- [15] Ya. V. Tarasenko, O. B. Piven and I. M. Fedotova-Piven, "Method of the 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].

Ya. V. Tarasenko, Ph. D.,
e-mail: yaroslav.tarasenko93@gmail.com
V. H. Babenko, Dr. Tech. Sc., Associate Professor
e-mail: v.babenko@chdtu.edu.ua
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

METHOD FOR COMPUTERIZED MODIFICATION OF ENGLISH TEXT BASED ON PSYCHOSEMANTIC PROPERTIES

The article investigates the possibility of using psychosemantic properties to protect textual information with limited access. The developed method of computerized modification of English texts allows to increase the effectiveness of preventing the illegal distribution and use of textual information compared to methods that do not take into account the psychosemantic component. This makes it possible to protect modified semantically indivisible elements from their possible distortion or removal, given the threat of potential informational influences. The method allows to protect text documents and counteract cyber sabotage. To achieve the main aim of the article, it is decided to form psychosemantic properties on the basis of categorical apparatus and psycholinguistic profile. This makes it possible to embed the marker into a semantically indivisible component more effectively. In developing this method, the method of calculating the coherence of the text has been also improved and the worlds of perception of the semantic particle have been taken into account. Due to this, it becomes possible to increase the overall level of the text modification efficiency and the naturalness of its perception. The process of computerized modification of English texts with the help of computer tools has been simulated. The results of the comparison with similar approaches allow us to draw preliminary conclusions about the higher efficiency when working with medium and high volume texts. The obtained experimental data also make it possible to determine the resistance of the texts modified by the developed method to the use of specialized means of semantic removal of existing markers. It is revealed that semantic compression had not removed any modified objects. The proposed method can be used in Data Loss Prevention systems and Digital Signature systems. Further development of a steganographic protocol for digital watermark embedding is envisaged with the help of the developed method of English texts modification.

Keywords: computerized text modification, psychosemantic properties, semantically indivisible component, information with limited access, quantum-semantic analysis, subjective perception of semantics.

УДК 004.032.26

[0000-0002-6614-4133] **Т. Ю. Уткіна**, канд. техн. наук, доцент,
Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна
e-mail: t.utkina@chdtu.edu.ua
[0000-0002-0592-2413] **В. Г. Рябцев**, д-р техн. наук, професор
Черкаська філія ПВНЗ «Європейський університет»

ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ У ПЛІС НЕЙРООБЧИСЛЮВАЧІВ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ СТАНУ РОЗВИТКУ ЕМБРІОНІВ ПТАШЕНЯТ КУРЕЙ

Нині на птахофабриках періодично виконується овоскопування яєць з метою визначення фертильності курячих ембріонів, що мають три стани: живі, мертві та слабкі, а потім вживаються заходи для підвищення вилуплюваності. У статті розроблено два проекти нейрообчислювачів, які імплементовані у програмовані логічні інтегральні схеми фірми Xilinx, призначені для автоматизації моніторингу розвитку курячих ембріонів шляхом розпізнавання їх стану під час інкубації. Розроблено методу поділу площі курячого яйця на 23 сектори для автоматизації процесу овоскопування. Розроблено схематехнічну VHDL-модель нейронної мережі, що містить 23 нейрони, яка складається з суматора елементів вектора вхідного сигналу та віднімача, що формує вихідні сигнали мережі. Розроблено проект нейронної мережі Хопфілда та виконано верифікацію його моделі за тестовими наборами. Результати моделювання підтвердили високу достовірність нейрообчислювачів при розпізнаванні різних станів ембріонів пташенят курей.

Ключові слова: штучна нейронна мережа, курячі ембріони, овоскопування, мережа Хопфілда, технічний зір.

Вступ. Сучасне птахівництво є важливою галуззю, яка забезпечує продовольчу безпеку України. Важливим етапом розведення птиці є процес інкубації яєць. Сучасні інкубатори є складними технічними системами, що забезпечують необхідні технологічні умови процесу інкубації: температуру, вологість, склад повітря в інкубаторі, обсяг повітря, що вентилується, та інші параметри. Навіть невеликі відхилення від заданих параметрів інкубації знижують відсоток вилуплюваних яєць і призводять до значних витрат енергії.

Для контролю параметрів інкубації, крім автоматичних засобів підтримки мікроклімату в інкубаторі, застосовують процедуру овоскопування яєць, яка для курячих яєць проводиться на 7-у, 11-у, 19-у добу. При першому огляді яєць виділяють незапліднені яйця та яйця з кров'яними кільцями («кров-кільце»). У незаплідненому яйці ембріон не просвічується, видно лише жовток у центрі яйця у вигляді великої жовтої плями. При другому огляді основним критерієм розвитку ембріонів є швидкість замикання алантоїса в гострому кінці яйця. Виявляється сильне відставання у розвитку ембріона, який розташований у центрі яйця,

але розміри його невеликі, судини алантоїса погано наповнені кров'ю, гострий кінець яйця просвічується. При третьому огляді встановлюють розміри повітряної камери, ступінь розвитку самого ембріона і виділяють яйця із загнблними ембріонами внаслідок асфіксії [1-4].

Моніторинг розвитку курячих ембріонів є важливою частиною процесу вилуплення, що дозволяє визначити, коли яйце не розвивається, а також коли яйце близьке до вилуплення. Можливість встановити, що яйце більше не розвивається, дає змогу видаляти мертві яйця з інкубатора, щоб запобігти марному витрачання часу та енергії на інкубацію яєць, які не є фертильними, та запобігти поширенню бактеріальної інфекції від яєць, які більше не розвиваються через таку інфекцію [5].

У більшості випадків овоскопування яєць виконують шляхом просвічування за допомогою молоточкового овоскопа. Однак часу на виконання ручного овоскопування за допомогою молоточкового овоскопа замало, тому що через охолодження яєць можуть завмерти ембріони пташенят. У фермерських інкубаторіях та птахівницьких господарствах використовують міражні столи, на яких підсвічується

весь лоток яєць, проте контроль розвитку зародків пташенят є стомлюючою процедурою, при виконанні якої особливо страждають зорові органи оператора.

Відома система машинного зору для виявлення фертильних яєць під час інкубації [6]. Цей метод застосовується для наукових досліджень, а для птахофабрик потрібна розробка автоматизованих систем моніторингу розвитку ембріонів пташенят курей у процесі інкубації.

Додавання до системи машинного зору штучної нейронної мережі дасть змогу автоматизувати моніторинг розвитку курячих ембріонів та підвищити достовірність розпізнавання їх стану під час інкубації [7, 8].

Відомий принцип побудови нейронної мережі Хопфілда, реалізованої на програмованій логічній інтегральній схемі (ПЛІС) Cyclone II фірми Altera, яка призначена для пошуку найкоротших шляхів у мережах зв'язку [9]. Проте ця нейронна мережа має складну архітектуру і, відповідно, велику трудомісткість її модифікації для іншого застосування.

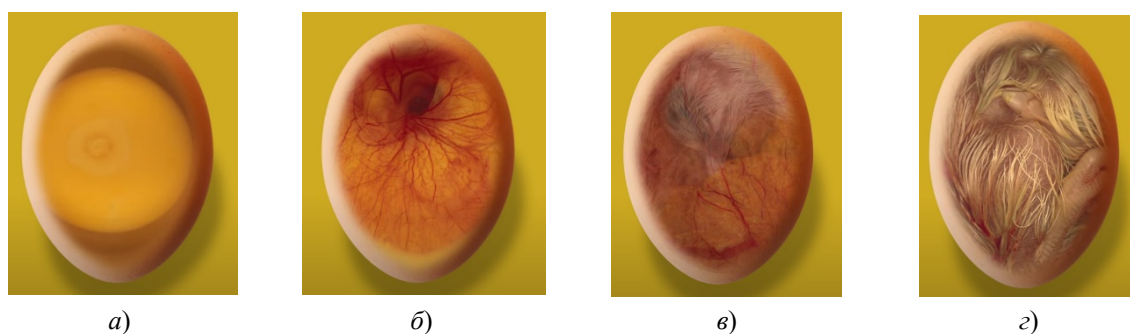
Мета та задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності моні-

рингу інкубаційного розвитку ембріонів пташенят курей за рахунок розробки проекту інтелектуальної системи для автоматизації процесу овоскопування курячих яєць завдяки розпізнаванню стану розвитку курячих ембріонів під час інкубації за допомогою системи технічного зору, що складається зі смарт-камери та нейрообчислювачів, які реалізовані на ПЛІС та виконують функції штучної нейронної мережі.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- вибрати структуру інтелектуальної системи автоматизованого моніторингу інкубаційного розвитку ембріонів пташенят;
- розробити проекти нейрообчислювачів, що виконують розпізнавання стану розвитку ембріонів пташенят під час інкубації, для імплементації їх у ПЛІС.

Виклад основного матеріалу. Фотографії, наведені на рисунку 1, показують поступовий розвиток ембріонів пташенят курей при збільшенні часу інкубації. Зміна світлого фону фотографій на темніші тони дає можливість ідентифікувати розвинені та мертві ембріони за допомогою штучної нейронної мережі.



а) 1-а доба; б) 7-а доба; в) 14-а доба; г) 19-а доба

Рисунок 1 – Фотографії курячих яєць в процесі інкубації

Значення відтінків сірого кольору, показані на рисунку 2, для запліднених, незапліднених і мертвих яєць у шкаралупі, дозволяють чітко розрізнити стани ембріонів пташенят, починаючи з 7-ї доби інкубації. Ці ознаки дають можливість розпізнавати запліднені й незапліднені яйця, а також яйця, що містять мертві ембріони.

Для обробки даних процесу овоскопування за допомогою нейронної мережі площа курячого яйця розділена на 23 секції, як наведено на рисунку 2, а. У хорошому яйці,

зображеному на рисунку 2, б, доцільно аналізувати стан секторів $S_1 - S_{23}$. Стан секторів яйця, де немає ембріона, представлено на рисунку 2, в, у такому яйці особливо виділяються сектори S_{17}, S_{18}, S_{21} .

У яйці з мертвим ембріоном, вигляд секторів якого наведено на рисунку 2, г, особливо ретельно необхідно аналізувати стан секторів S_{10}, S_{14} та S_{17} . Запропонований метод поділу площі курячого яйця дозволяє вибрати структуру штучної нейронної мережі [10-12].

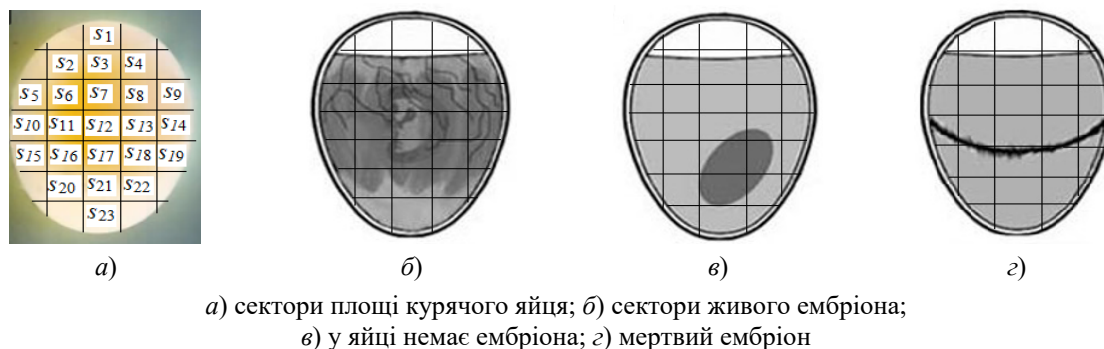


Рисунок 2 – Сектори курячого яйця на різних стадіях розвитку ембріона

Вибір структури штучної нейронної мережі. Для розпізнання станів розвитку ембріонів пташенят курей перспективним є застосування нейронної мережі Хопфілда, що містить 23 нейрони, структура якої наведена на рисунку 3 [13].

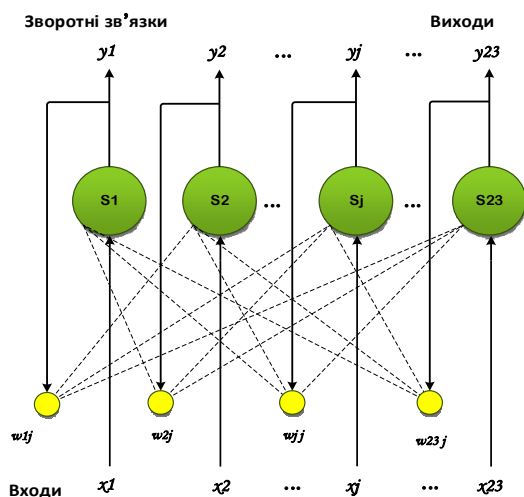


Рисунок 3 – Структура мережі Хопфілда

Мережа Хопфілда має обмежені можливості, тому кількість запам'ятовуваних образів m не повинна перевищувати величини, приблизно рівної $0.15n$, де n – кількість нейронів, тобто мережа з 23 нейронів може розпізнати три стани розвитку ембріонів пташенят курей [14]. Як еталонні зразки на входи мережі можна подавати вектори сигналів V_1 , V_2 , V_3 , що відповідають живому, мертвому ембріонам, а також відсутності ембріона відповідно:

$$\begin{aligned} V_1 &= 01111111111111111110, \\ V_2 &= 0000000001000100100000, \\ V_3 &= 00000000000000001100100. \end{aligned}$$

За результатами дослідження, які наведено нижче, встановлено, що здатність мережі Хопфілда розпізнавати об'єкти зростає, якщо на її входи подавати сигнали з набору 1 і -1 замість сигналів з набору 1 і 0. Водночас кількість крайових контактів ПЛІС може збільшитися в два рази, оскільки необхідно ще кодувати символи вхідних сигналів. Щоб виключити збільшення кількості контактів ПЛІС, пропонується застосувати процедуру перетворення кодів вектора вхідних сигналів V_{in} , наведену нижче.

```
Vin: in std_logic_vector(0 to n-1);
signal Vtest: int_array:= (others=>0);
signal Vminus: integer:= -1;
signal Vplus: integer:= 1;
for i in 0 to n-1 loop
    if Vin(i) = '0' then
        Vtest(i) <= Vminus;
    else Vtest(i) <= Vplus;
    end if;
end loop;
```

Для формування матриці ваг мережі Хопфілда, що містить n нейронів, для якої застосовані m зразкових наборів, виконуються такі арифметичні операції з векторами:

$$\forall i = 0 \dots n-1, \forall j = 0 \dots n-1 \rightarrow$$

$$W(i, j) := \sum_{k=1}^m \left(v_k(j) \cdot v_k(i)^T \right), \quad (1)$$

$$W(i, i) = 0.$$

Проте для виконання таких операцій потрібні значні витрати апаратних засобів ПЛІС. Здійснено спробу попередньо обчислити матрицю ваг мережі Хопфілда й додати її до проекту у вигляді матриці цілих чисел зі знаком розміром 23×23 . Однак компілятор системи автоматизованого проектування Active-HDL версії 7.3 не зміг конвертувати матрицю цього розміру, тому для моделювання було сформо-

вано матрицю ваг мережі Хопфілда за допомогою програми, яка розроблена на мові C++.

Для скорочення розміру VHDL-моделі мережі Хопфілда розроблено процедуру множення матриці на вектор цілих чисел, текст якої наведено нижче.

```

procedure matrix_multiply (a: in
integer_matrix; b: in integer_vector;
n: in integer; c: out integer_vector)
is
variable temp: integer_vector:= (others => 0);
begin
  for i in 0 to n-1 loop
    for j in 0 to n-1 loop
      temp(i):= temp(i) + (a(i,j) *
b(j));
    end loop;
  end loop;
  for i in 0 to n-1 loop
    c(i) := temp(i);
  end loop;
end matrix_multiply;

```

Якщо завдання розпізнання ембріонів пташенят спростити та звести класифікацію до двох класів: «хороший» або «поганий», то структуру штучної нейронної мережі (ШНМ) можна спростити та застосувати ШНМ, структура якої містить один шар нейронів та зображена на рисунку 4.

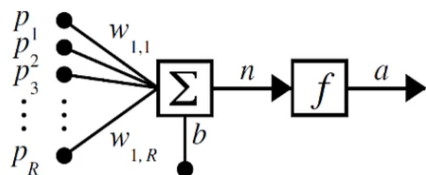


Рисунок 4 – ШНМ з одним шаром нейронів

У математичному представленні функціонування нейрона k можна описати такою парою рівнянь:

$$v_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} \cdot x_j + b_k;$$

$$y_k = \varphi(v_k);$$

де $x_1, x_2, \dots, x_m$ – вхідні сигнали;

$w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$ – синаптичні ваги нейрона;

b_k – поріг;

$\varphi(\cdot)$ – функція активації;

y_k – вихідний сигнал нейрона.

Враховуючи обрану структуру секторів площі яйця, вибираємо ШНМ з 23 нейронами. Світлий сектор відповідає вхідному сигналу ШНМ, що дорівнює 0, а темний сектор – сигналу 1. Величину порога b_k необхідно змінювати при збільшенні тривалості інкубації в діапазоні від 6 до 21. Наприклад, на 7-у добу інкубації $b_k = 6$, на 14-у добу $b_k = 13$, на 19-у добу $b_k = 21$.

Для активації нейрона вибираємо функцію одиничного стрибка, наведену у формулі

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{якщо } v_k \geq 0; \\ 0, & \text{якщо } v_k < 0, \end{cases}$$

де v_k – індуковане локальне поле нейрона.

Спрощення завдання ідентифікації стану ембріонів пташенят курей дає змогу розробити схемотехнічний проект ШНМ з одним шаром нейронів без зворотних зв'язків, структура якого зображена на рисунку 5.

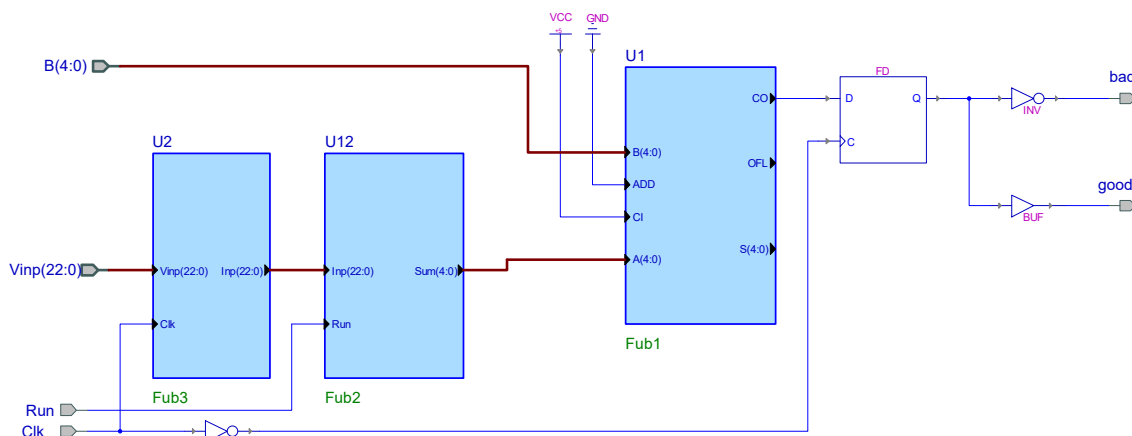


Рисунок 5 – Структура проекту ШНМ з одним шаром нейронів

Мережа складається з регістра для зберігання кодів вхідних сигналів Fub3, суматора Fub2, віднімача Fub1 і тригера FD для зберігання результату розпізнавання стану ембріона. Двійкові коди стану ембріона, отримані від системи технічного зору, тактовим сигналом Clk запам'ятовуються в регістрі Fub3. У суматорі Fub2 під час надходження сигналу Run відбувається додавання кодів вхідного вектора V_{inp} (22:0) за допомогою арифметичних операцій, наведених нижче.

```
architecture Fub2 of Fub2 is
    signal tmp: std_logic_vector(4 downto 0);
begin
    tmp <= ("0000"&Inp(0)) +
           ("0000"&Inp(1)) + ("0000"&Inp(2)) +
           ("0000"&Inp(3)) + ("0000"&Inp(4)) +
           ("0000"&Inp(5)) + ("0000"&Inp(6)) +
           ("0000"&Inp(7)) + ("0000"&Inp(8)) +
           ("0000"&Inp(9)) + ("0000"&Inp(10)) +
           ("0000"&Inp(11)) + ("0000"&Inp(12)) +
           ("0000"&Inp(13)) + ("0000"&Inp(14)) +
           ("0000"&Inp(15)) + ("0000"&Inp(16)) +
           ("0000"&Inp(17)) + ("0000"&Inp(18)) +
           ("0000"&Inp(19)) + ("0000"&Inp(20)) +
           ("0000"&Inp(21)) + ("0000"&Inp(22));
    when Run = '1' else "00000";
    Sum <= tmp;
end Fub2;
```

Значення порога мережі в двійковому коді надходить на входи (4:0) мережі і віднімається від суми Sum (4:0), сформованої суматором Fub2. Результати розпізнавання стану ембріона видаються на виходи мережі. Для фіксування закінчення процесу розпізнавання застосовується тригер FD, за станом якого на виходи мережі видаються сигнали "good" або "bad", що відповідає хорошему або поганому стану ембріона пташеняти.

Методика та загальна схема експериментів. Позитивні результати моделювання проекту мережі Хопфілда в системі Active-HDL дають можливість імплементувати його в ПЛІС фірми Xilinx.

У навігаторі проектів фірми Xilinx зроблено проект, що містить програмну модель мережі Хопфілда [15, 16]. Компіляція проекту, що містить матрицю дійсних чисел, виконана навігатором без помилок. Однак апаратні засоби ПЛІС неспроможні виконати декілька операцій процедури множення матриці розміром 23×23 на вектор із різними

кодами без застосування мультиплексорів, тому у тексті програми мережі Хопфілда виконано заміну процедури множення на набір операторів відповідно до формули (1).

З метою зменшення апаратних засобів, необхідних для імплементції проекту у ПЛІС, зменшено кількість секцій яйця, що контролюються під час проведення овоскопування. Для дослідження вибрано такі секції: $S_2 - S_4$; $S_6 - S_8$; $S_{11} - S_{13}$; $S_{16} - S_{18}$; $S_{20} - S_{22}$, наведені на рисунку 2, що дозволило скоротити матрицю ваг ШНМ до розміру 15×15. Така мережа дає змогу розпізнати $0.15 \cdot 15 > 2$ станів ембріонів пташенят у процесі інкубації, водночас скорочується кількість елементів ПЛІС, необхідних для реалізації проекту.

Результати досліджень. Для реалізації проекту мережі Хопфілда обрано ПЛІС типу xc600e сімейства Virtex E. Процедури імплементції проекту в ПЛІС, наведені на рисунку 6, виконані успішно.

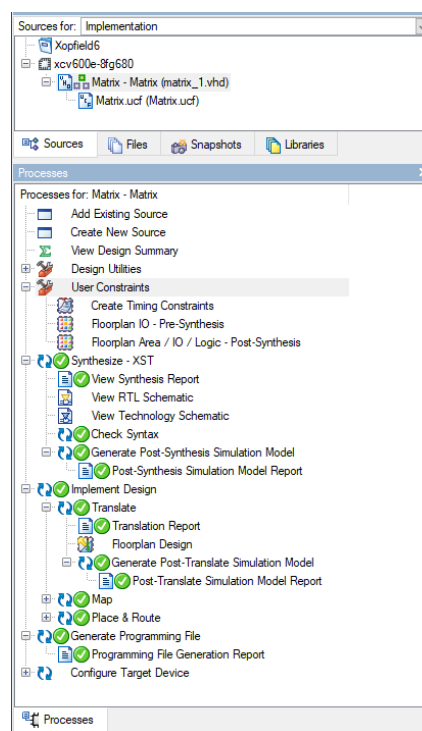


Рисунок 6 – Процедури імплементції проекту

Облік ресурсів ПЛІС типу xc600e, що застосовуються для реалізації мережі Хопфілда, наведено в таблиці 1.

Для реалізації нейрообчислювача мережі Хопфілда застосовано 32 мультиплексори розміром 32×32; 554 суматори/віднімачі; 32 ре-

гістри по 32 розряди в кожному і 30 32-розрядних компараторів. Компоненти нейрообчислювача мережі Хопфілда займають 75 % площі кристалу.

Таблиця 1 – Облік ресурсів ПЛІС xc3s500e

Назва компонента	Усього компонентів		Застосовано, %
	у проекті	у ПЛІС	
Number of Slices	5428	6912	78
Number of 4 input LUTs	8974	13824	64
Number of bonded IOBs	20	512	3
Number of GCLKs	3	4	75
Number of Slices containing only related logic	4635	4635	100

Споживана мікросхемою потужність становить 301 мВт: 160 мА від джерела 1,8 В і 288 мА від джерела 3,3 В.

Згенерований файл network.bit для програмування ПЛІС має ємність 495 276 біт. Розподіл кулькових виводів на поверхні корпусу ПЛІС типу xc3s500e, що виконує функції мережі Хопфілда, показано на рисунку 7.

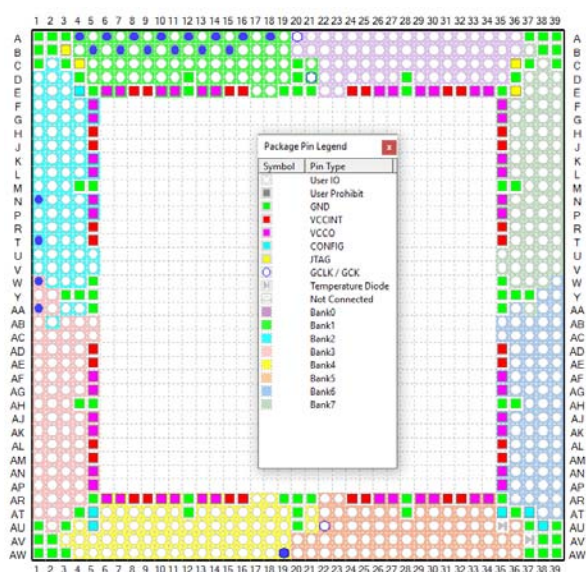


Рисунок 7 – Розподіл виводів ПЛІС xc3s500e

У середовищі Xilinx ISE виконано імплементацію ШНМ одним шаром нейронів без зворотних зв'язків у ПЛІС типу xc3s500e сімейства Spartan3E. Отримано умовне графічне відображення (УГВ) нейрообчислювача, зображене на рисунку 8.

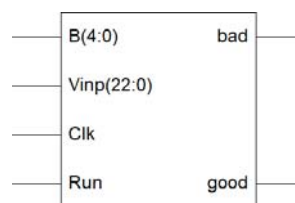


Рисунок 8 – УГВ нейрообчислювача

Мінімальне значення періоду синхросигналу проекту становить 31,5 нс, що відповідає максимальній частоті 31,746 МГц.

Сформовано файл network.bit для програмування ПЛІС ємністю 283 850 біт. Ємність пам'яті конфігурації дорівнює 220 Мбіт. Всього в ПЛІС задіяно 32 зовнішні контакти, за винятком виводів для джерела електроживлення.

Облік ресурсів ПЛІС xc3s500e, які застосовані для реалізації твердотілого нейрообчислювача з одним шаром нейронів без зворотного зв'язку, наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Облік ресурсів ПЛІС xc3s500e

Назва компонента	Усього		Застосовано, %
	у проекті	у ПЛІС	
Number of Slice Flip Flops	24	9312	0,26
Number of 4 input LUTs	83	9312	1
Number of bonded IOBs	32	158	20
Number of Slices containing only related logic	57	57	100

Розподіл крайових виводів ПЛІС xc3s500e, що виконує функції ШНМ з одним шаром нейронів без зворотного зв'язку, наведено на рисунку 9.

Потужність, споживана мікросхемою xc3s500e, становить 81 мВт: 26 мА від джерела 1,2 В та 20 мА від джерела 2,5 В. Компоненти нейрообчислювача з одним шаром нейронів без зворотних зв'язків займають 5 % площі кристалу xc3s500e.

I/O Name	I/O Direction	Loc	Bank	I/O Std.
B<0>	Input	P2	BANK3	
B<1>	Input	P3	BANK3	
B<2>	Input	P4	BANK3	
B<3>	Input	P5	BANK3	
B<4>	Input	P8	BANK3	
bad	Output	P106	BANK1	
Clk	Input	P80	BANK2	
good	Output	P107	BANK1	
Run	Input	P108	BANK1	
Vinp<0>	Input	P160	BANK0	
Vinp<1>	Input	P161	BANK0	
Vinp<2>	Input	P162	BANK0	
Vinp<3>	Input	P163	BANK0	
Vinp<4>	Input	P164	BANK0	
Vinp<5>	Input	P165	BANK0	
Vinp<6>	Input	P153	BANK1	
Vinp<7>	Input	P152	BANK1	
Vinp<8>	Input	P151	BANK1	
Vinp<9>	Input	P150	BANK1	
Vinp<10>	Input	P147	BANK1	
Vinp<11>	Input	P146	BANK1	
Vinp<12>	Input	P145	BANK1	
Vinp<13>	Input	P144	BANK1	
Vinp<14>	Input	P140	BANK1	
Vinp<15>	Input	P139	BANK1	
Vinp<16>	Input	P138	BANK1	
Vinp<17>	Input	P65	BANK2	
Vinp<18>	Input	P64	BANK2	
Vinp<19>	Input	P63	BANK2	
Vinp<20>	Input	P62	BANK2	
Vinp<21>	Input	P69	BANK2	
Vinp<22>	Input	P68	BANK2	

Рисунок 9 – Крайові виводи ПЛІС xc3s500e

У середовищі Active-HDL виконано моделювання проекту нейрообчислювача, що виконує функції мережі Хопфілда, результати моделювання зображено на рисунку 10.

У проект мережі додано сигнал inst, що забезпечує початок виконання процесу перетворення вхідного двійкового вектора Vin в масив цілих чисел зі знаком. Вхідний вектор Vin від початку близько відповідав набору, який формується при дослідженні хорошого ембріона пташеняти, тому на вихід мережі був виданий сигнал "good". При надходженні на вхід мережі кодів вектора, які значно відрізняються від набору, який формується при обстеженні хорошого ембріона, на вихід мережі був виданий сигнал "bad".

На входи Vinp подавалися двійкові коди, що відповідають станам ембріонів пташенят, а на входи B – значення порогу. Залежно від

різниці значень цих кодів на виходи мережі видаються сигнали "good" чи "bad".

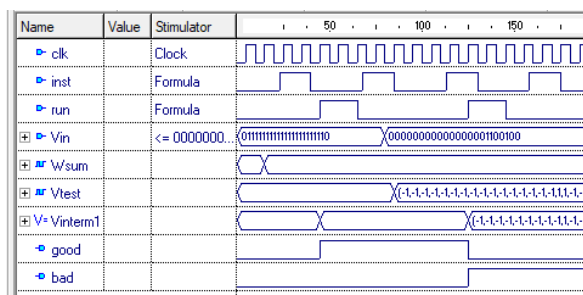


Рисунок 10 – Результати моделювання проекту мережі Хопфілда

Також було виконано моделювання проекту нейрообчислювача, що містить один шар нейронів без зворотних зв'язків, результати моделювання якого зображено на рисунку 11.

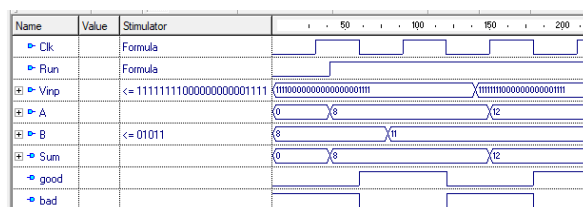


Рисунок 11 – Результати моделювання ШНМ без зворотних зв'язків

При перевищенні суми вхідних сигналів мережі заданого порогу на вихід мережі видається сигнал "good", інакше – сигнал "bad". Таким чином, результати моделювання підтверджують працездатність нейрообчислювача.

Обговорення результатів. Нейрообчислювач, імплементований в ПЛІС, потрібно встановити на смарт-камеру NI1744. Факт розпізнання нейрообчислювачем мертвого або живого ембріону встановлюється світлодіодами, що підсвічуються: "good" або "bad". Для перемикання нейрообчислювача в робочий стан на його вхід Run необхідно подати та зафіксувати напругу високого рівня. При виконанні самоконтролю системи технічного зору потрібно по черзі спрямовувати смарт-камеру на листи білого та чорного паперу. Під час огляду білого аркуша справний нейрообчислювач має сформувати сигнал "bad", а чорного аркуша – сигнал "good". Для усунення мерехтіння світлодіодів при виконанні процедури овоскопування яєць частоту тактового сигналу Clk необхідно зменшити таким чином, щоб

синхросигнал подавався синхронно з частотою заміни яєць, що досліджуються.

У статті знайшли подальший розвиток принципи побудови мережі Хопфілда для її реалізації на ПЛІС.

В ПЛІС типу xc600e сімейства Virtex E імплементований нейрообчислювач, що містить 15 нейронів, які виконують функції мережі Хопфілда. Еталонні зразки вхідних сигналів цієї мережі обрані для стану ембріонів пташенят на 19-у добу інкубації.

Для використання цього нейрообчислювача на ранніх термінах інкубації його проект потрібно змінити шляхом застосування нових еталонних наборів сигналів.

В ПЛІС типу xc3s500e сімейства Spartan3E імплементований нейрообчислювач, який виконує функції одношарової ШНМ з 23 нейронами без зворотних зв'язків. Додавання зовнішніх змінних з'єднувальних колодок у конструкцію системи технічного зору, на яких встановлені перемички, що підключають входи (4:0) до напруги високого рівня або до загального виводу, дозволяє змінювати поріг спрацювання ШНМ для різних діб процесу інкубації яєць. Водночас не потрібна заміна самого обчислювача.

При порівнянні отриманих даних, наведених у таблиці 1 і таблиці 2, доходимо висновку, що виготовити обидва нейрообчислювачі на однакових ПЛІС неможливо, адже ПЛІС xc3s500e не має ресурсів, необхідних для розміщення в ній компонентів, які застосовуються для мережі Хопфілда.

Враховуючи можливість зміни порогу спрацювання ШНМ за рахунок застосування змінних з'єднувальних колодок, нейрообчислювачі з 23 нейронами без зворотних зв'язків рекомендується використовувати на ранніх етапах інкубації яєць. Нейрообчислювач, що виконує функції мережі Хопфілда, з високим ступенем достовірності може виявляти яйця з хорошими або загненими ембріонами пташенят на 19-у добу інкубації.

Яйця, в яких відсутні зародки, виявляються з високою достовірністю нейрообчислювачем з 23 нейронами без зворотних зв'язків і видаляються з інкубатора на ранніх етапах інкубації.

Висновки. З метою підвищення ефективності моніторингу інкубаційного розвитку

ембріонів пташенят курей в роботі запропоновано проект інтелектуальної системи для автоматизації процесу овоскопування курячих яєць завдяки розпізнаванню стану розвитку курячих ембріонів під час інкубації за допомогою системи технічного зору, що складається зі смарт-камери та нейрообчислювачів, які реалізовані на ПЛІС та виконують функції штучної нейронної мережі.

Наукова новизна статті полягає у роботі структури проекту інтелектуальної системи для автоматизації процесу овоскопування курячих яєць під час інкубації, що також включає запропоновані проекти нейрообчислювачів, які виконують розпізнавання стану розвитку ембріонів пташенят курей відповідно до принципів побудови ШНМ для їх подальшої реалізації на ПЛІС.

Практичне значення. Можливість за допомогою нейрообчислювачів уважніше стежити за розвитком ембріонів дає змогу визначити оптимальний час для зміни параметрів інкубації та створення найкращих умов вилуплення яєць, що веде до більш ефективного виробництва курчат.

Перспективи подальших досліджень. Автоматизоване овоскопування яєць можна реалізувати, застосовуючи систему технічного зору NI EVS-1464R компанії National Instruments. Доукомплектована нейрообчислювачем смарт-камера NI1744 встановлюється на кронштейнах, що переміщуються, також, як бормашина. Переміщення оператором смарт-камери вздовж лотка з яйцями дозволить автоматизувати отримання даних щодо якості розвитку пташенят у процесі інкубаційного розвитку. Водночас підвищується продуктивність овоскопування, знижується стомлюваність очей та втома персоналу, що зменшує витрати ресурсів через виключення неправильних дій.

Список використаних джерел

- [1] L. J. F. van de Ven, L. Baller, A. V. van Wagenberg, B. Kemp, and H. van den Brand, "Effects of egg position during late incubation on hatching parameters and chick quality", *Poultry Science*, no. 90 (10), pp. 2342-2347, 2011.
doi: 10.3382/ps.2011-01467.

- [2] G. M. Fasenko, "Egg storage and the embryo", *Poultry Science*, no. 86 (5), pp. 1020-1024, 2007.
doi: 10.1093/ps/86.5.1020.
- [3] R. M. Hulet, "Symposium: Managing the embryo for performance managing incubation: Where are we and why?", *Poultry Science*, no. 86 (5), pp. 1017-1019, 2007.
doi: 10.1093/ps/86.5.1017.
- [4] Т. Ю. Уткіна, В. Є. Кісельов, та В. Г. Рябцев, "Система автоматичного управління освітленням птахофабрики в режимах "світанок-захід", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, с. 5-13, 2021.
doi: 10.24025/2306-4412.3.2021.242241.
- [5] H. Islam, N. Kondo, Y. Ogawa, T. Fujiura, Y. Ogawa, and S. Fujitani, "Detection of infertile eggs using visible transmission spectroscopy combined with multivariate analysis", *Eng. Agric. Environ.*, vol. 10, pp. 115-120, 2017.
doi: 10.1016/j.eaef.2016.12.002
- [6] H. Yu, G. Wang, Z. Zhao, H. Wang, and Z. Wang, "Chicken embryo fertility detection based on PPG and convolutional neural network", *Infrared Physics & Technology*, vol. 103, p. 103075, 2019.
doi: 10.1016/j.infrared.2019.103075.
- [7] N. Haefner, J. Wincent, V. Parida, and O. Gassmann, "Artificial intelligence and innovation management: A review, framework, and research agenda", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 162, p. 120392, 2021.
doi: 10.1016/j.techfore.2020.120392.
- [8] M. Hashemzadeh, and N. Farajzadeh, "A machine vision system for detecting fertile eggs in the incubation industry", *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 9, no. 5, pp. 850-862, 2016.
doi: 10.1080/18756891.2016.1237185.
- [9] H. Asgari, and Y. S. Kavian, "Hardware description of digital Hopfield neural networks for solving shortest path problem", *Neural Network World*, no. 2/14, pp. 211-230, 2014.
doi: 10.14311/NNW.2014.24.013.
- [10] С. Короткий, "Нейронные сети Хопфилда и Хэмминга". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/86091/>.
- [11] С. Осовский, *Нейронные сети для обработки информации*: пер. с англ. Москва, Россия: Финансы и статистика, 2002.
- [12] Р. В. Шамин, "Лекции по искусственному интеллекту и машинному обучению. Лекция № 3. Нейронная сеть Хопфилда". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ai.lector.ru/?go=lection03>. Дата обращения: Нояб. 07, 2021.
- [13] С. Хайкин, *Нейронные сети: полный курс*. Изд. 2-е, исп.; пер. с англ. Москва, Россия: И.Д. Вильямс, 2006.
- [14] В. Махов, В. Ширококов, и А. Закутаев, "Построение систем технического зрения на базе компьютерных технологий National Instruments", *Control Engineering*, no. 4 (76), pp. 62-69, 2018.
- [15] SmartXplorer for ISE Project Navigator Users. [Online]. Available: https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx12_1/ug689.pdf.
- [16] И. Е. Тарасов, *Разработка цифровых устройств на основе ПЛИС XILINX® с применением языка VHDL*. Москва, Россия: Горячая линия-Телеком, 2005.

References

- [1] L. J. F. van de Ven, L. Baller, A. V. van Wagenberg, B. Kemp, and H. van den Brand, "Effects of egg position during late incubation on hatching parameters and chick quality", *Poultry Science*, no. 90 (10), pp. 2342-2347, 2011.
doi: 10.3382/ps.2011-01467.
- [2] G. M. Fasenko, "Egg storage and the embryo", *Poultry Science*, no. 86 (5), pp. 1020-1024, 2007.
doi: 10.1093/ps/86.5.1020.
- [3] R. M. Hulet, "Symposium: Managing the embryo for performance managing incubation: Where are we and why?", *Poultry Science*, no. 86 (5), pp. 1017-1019, 2007.
doi: 10.1093/ps/86.5.1017.
- [4] T. Yu. Utkina, V. E. Kiselyov, and V. G. Ryabtsev, "Automatic light control system of poultry factory in "sunrise-sunset" modes", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo*

- tekhnologichnogo universytetu*, no. 3, pp. 5-13, 2021.
doi: 10.24025/2306-4412.3.2021.242241.
- [5] H. Islam, N. Kondo, Y. Ogawa, T. Fujiura, Y. Ogawa, and S. Fujitani, "Detection of infertile eggs using visible transmission spectroscopy combined with multivariate analysis", *Eng. Agric. Environ.*, vol. 10, pp. 115-120, 2017.
doi: 10.1016/j.eaef.2016.12.002.
- [6] H. Yu, G. Wang, Z. Zhao, H. Wang, and Z. Wang, "Chicken embryo fertility detection based on PPG and convolutional neural network", *Infrared Physics & Technology*, vol. 103, p. 103075, 2019.
doi: 10.1016/j.infrared.2019.103075.
- [7] N. Haefner, J. Wincent, V. Parida, and O. Gassmann, "Artificial intelligence and innovation management: A review, framework, and research agenda", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 162, p. 120392, 2021.
doi: 10.1016/j.techfore.2020.120392.
- [8] M. Hashemzadeh, and N. Farajzadeh, "A machine vision system for detecting fertile eggs in the incubation industry", *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 9, no. 5, pp. 850-862, 2016.
doi: 10.1080/18756891.2016.1237185.
- [9] H. Asgari, and Y. S. Kavian, "Hardware description of digital Hopfield neural networks for solving shortest path problem", *Neural Network World*, no. 2/14, pp. 211-230, 2014.
doi: 10.14311/NNW.2014.24.013.
- [10] S. Korotkiy, "Hopfield and Hamming neural networks". [Online]. Available: <https://www.twirpx.com/file/86091/> [in Russian].
- [11] S. Osovskiy, *Neural Networks for Information Processing*, trans. from Eng. Moscow, Russia: Financy i statistika, 2002 [in Russian].
- [12] R. V. Shamin, "Lectures for artificial intelligence and machine learning. Lecture no. 3. Hopfield neural network". [Online]. Available: <http://ai.lector.ru/?go=lection03>. Accessed on: Nov. 07, 2021 [in Russian].
- [13] S. Khaykin, *Neural Networks: Full Course*, 2nd ed., cor.; trans. from Eng. Moscow, Russia: I.D. Williams, 2006 [in Russian].
- [14] V. Makhov, V. Shirobokov, and A. Zakutayev, "Building of Technical Vision Systems Based on National Instruments Computer Technologies", *Control Engineering*, no. 4 (76), pp. 62-69, 2018 [in Russian].
- [15] SmartXplorer for ISE Project Navigator Users. [Online]. Available: https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx12_1/ug689.pdf.
- [16] I. E. Tarasov, *Development of Digital Devices Based on Xilinx® Products using a VHDL Language*. Moscow, Russia: Goryachaya liniya-Telekom, 2005 [in Russian].

T. Yu. Utkina, Ph. D., Associate Professor,
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine
e-mail: t.utkina@chdtu.edu.ua
V. G. Ryabtsev, Dr. Tech. Sc., Professor
Cherkasy branch of the European University

FPGA IMPLEMENTATION OF NEUROCOMPUTERS TO RECOGNIZE THE STATE OF DEVELOPMENT OF CHICKEN EMBRYOS

The hatchery industry is one of the main industries providing food for the population and plays an important role in poultry production. Egg hatchability is affected by many factors such as egg handling, egg fertility, parent flock problem, etc. However, the most important factor is the assurance that the eggs placed in the incubator are indeed fertilized. In most hatcheries, the process of separating fertilized and infertile eggs is carried out by specialists in the traditional way with the help of human vision using ovoscopes. During the hatching of poultry, eggs are periodically ovoscoped in order to determine the condition of the embryos of the chicks. Early detection of infertile eggs and eggs with

dead embryos allows hatcheries to save energy, handling costs and prevent contamination of good eggs from broken eggs. The ovoscopying process is laborious and inefficient due to eye fatigue and operator errors, which have to check up to a thousand eggs per day. The article solves the problem of automating the process of eggs ovoscopying by adding to the machine vision system the neurocomputers capable of recognizing the embryos possible states at different stages of incubation. The two neurocomputers projects are implemented in Xilinx FPGA, which are designed to automate the monitoring of chicken embryos development by recognizing their condition during hatching. The first neurocomputer implemented in the xc3s500e FPGA contains 23 neurons not covered by feedback and counts the dark sections of the egg under study. Then the value of the threshold set for this period is subtracted from the received sum, and the obtained result is used to generate the output signals “good” or “bad”. The threshold value for different periods of ovoscopying can be changed by using interchangeable connecting blocks, which set the threshold values for the neurocomputer operation. The second neurocomputer, implemented in the xcv600e FPGA, contains 15 neurons covered by feedback, performs the functions of a Hopfield network and allows to recognize good eggs and eggs with dead embryos at late hatching periods with high reliability. The developed low-cost neurocomputers can complement the machine vision system for detecting fertilized eggs in the hatchery industry.

Keywords: *artificial neural network, chicken embryos, ovoscopying, a Hopfield network, technical vision.*

[0000-0003-3095-6743] **В. Д. Захарченко¹**, аспірант,

e-mail: vladyslav.zakharchenko1@gmail.com

[0000-0003-3647-3320] **М. В. Добролюбова²**, канд. техн. наук, доцент,

e-mail: m.dobroliubova@kpi.ua

[0000-0001-8730-2789] **О. В. Стаценко²**, канд. техн. наук, доцент,

e-mail: o.statsenko@kpi.ua

[0000-0002-7222-9352] **К. Л. Шевченко²**, д-р техн. наук, доцент

e-mail: k.shevchenko@kpi.ua

¹ТОВ «PEATISS»

вул. Казимира Малевича, 15, м. Київ, 02000, Україна

²Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

ОЦІНКА ПОХИБОК ПРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ДОСЛІДЖЕННІ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Статтю присвячено вирішенню задачі аналізу впливу похибок вимірювальних приладів, використовуваних під час виконання стандартизованих тестів асинхронних електричних двигунів, на точність оцінювання параметрів схем заміщення цих двигунів. У статті відповідно до міжнародних стандартів визначено методiku та послідовність проведення тестових досліджень асинхронного двигуна, необхідних для оцінювання параметрів його схем заміщення в номінальному режимі роботи. Також розроблено алгоритм розрахунку параметрів двигуна, отримано аналітичні вирази для розрахунку значень абсолютних похибок їх оцінювання та проаналізовано вплив похибок вимірювальних приладів на точність визначення цих параметрів. Використання отриманих у роботі результатів дає змогу оцінити очікувану точність визначення параметрів асинхронних двигунів на етапі, який передувє безпосередньо дослідженням, що, в свою чергу, дозволяє сформулювати вимоги до вимірювальних приладів.

Ключові слова: похибки вимірювань, асинхронний електричний двигун, прямі та непрямі вимірювання.

Вступ. На сьогоднішній день трифазні асинхронні двигуни широко розповсюджені в різних галузях промисловості, де використовуються в електроприводах різних технологічних комплексів [1, 2]. Це обумовлено їх простотою, хорошими масо-габаритними показниками, невеликою вартістю та простотою їх обслуговування [3, 4]. Для забезпечення ефективного використання асинхронних двигунів у складі регульованих електроприводів необхідним є отримання інформації про параметри їх схем заміщення [5-7]. Специфічною особливістю, пов'язаною з визначенням параметрів, є те, що схема заміщення асинхронного двигуна сама по собі є певною ідеалізацією, що призводить до неточності у визначенні величин параметрів [8, 9]. Існують різні методи визначення параметрів асинхронних машин, застосування яких передбачає створення заданих умов та використання відповідного обладнання [10-13]. В Україні цими пита-

нями займалися такі вчені, як С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, Д. Й. Родькін, О. П. Чорний та інші [14, 15]. Варто відзначити, що основну увагу в їх дослідженнях було приділено питанням отримання значень параметрів для керування електричними двигунами та моніторингу їх стану.

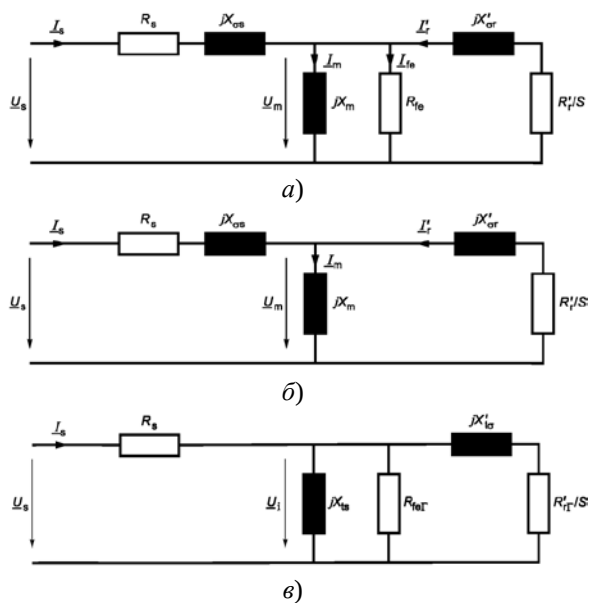
Базовим підходом до визначення параметрів є використання методик, наведених у міжнародному стандарті ІЕС 60034-28:2013 [16]. Цей стандарт визначає вимоги до проведення дослідів та процедури математичної обробки їх результатів для розрахунку параметрів схем заміщення асинхронного двигуна. Одночасно з цим основним недоліком застосування визначених стандартом методик є відсутність урахування впливу метрологічних характеристик вимірювального обладнання на точність визначення параметрів.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є визначення методики оцінки параметрів

рів схем заміщення асинхронних двигунів та аналіз впливу похибок вимірювальних приладів на точність визначення параметрів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі: визначити процедуру експериментальних випробувань та алгоритм математичної обробки вимірних даних, вивести аналітичні залежності похибок визначення параметрів та проаналізувати вплив метрологічних характеристик вимірювальних приладів на точність оцінки параметрів.

Основний матеріал

Експериментальні випробування асинхронних двигунів. Стандарт ІЕС 60034-28:2013 визначає експериментальні методи оцінки параметрів однофазних схем заміщення асинхронної машини. Нормативною є Т-подібна схема (рисунк 1, а). До її складу входять такі параметри: опори статора та ротора, індуктивність кола намагнічування, індуктивності розсіювання статора та ротора, еквівалентний опір втрат у сталі. Спрощена схема заміщення, в якій не враховуються втрати енергії в сталі (рисунк 1, б), використовується для визначення індуктивностей. Математично Т-подібна схема заміщення може бути перетворена на Г-подібну схему (рисунк 1, в). Використання різних схем заміщення дозволяє спростити визначення тих чи інших параметрів залежно від того, які досліді були проведені.



а) Т-подібна схема, б) спрощена Т-подібна схема, в) Г-подібна схема

Рисунок 1 – Схеми заміщення фази асинхронної електричної машини

Загалом стандарт визначає такі види експериментальних дослідів електричних машин: безпосереднє вимірювання опору статора на постійному струмі, дослідження на холостому ході, дослідження при навантаженні, дослідження при реверсі та дослідження при загальмованому роторі. Однак виконання всіх цих дослідів для оцінювання параметрів двигуна не є обов'язковим. Існують два підходи до розрахунку значень параметрів: перший ґрунтується на дослідженнях при холостому ході та при навантаженні, а другий – на дослідженнях при холостому ході, реверсі та загальмованому роторі. В зв'язку з тим, що перший підхід дає кращі результати, обмежимося розглядом саме цього підходу.

Для проведення зазначених експериментальних випробувань як навантаження для досліджуваного асинхронного двигуна доцільно використати іншу електричну машину з незалежним керуванням (наприклад постійного струму), яка працюватиме в генераторному режимі. Це дозволяє при дослідженні на холостому ході компенсувати механічні втрати тертя та вентиляційні втрати, що забезпечує майже ідеальний холостий хід, а при дослідженні з навантаженням легко задавати будь-яке значення навантаження. Для живлення досліджуваного двигуна варто використати перетворювач частоти, що дозволить проводити дослідження при різних значеннях напруги та різних частотах, що необхідно для отримання частотних залежностей оцінюваних параметрів.

Стандарт визначає вимоги до класу точності засобів вимірювання та процедури проведення досліджень. Відповідно до цих вимог значення опорів, струмів та напруг має розраховуватись як середнє арифметичне трьох фазних або міжфазних вимірюваних значень. Крім того, вимірювання струмів, напруг, потужності та частоти обертання необхідно проводити в усталених режимах, а для уникнення впливу можливих коливань навантаження як остаточні значення необхідно взяти середні значення декількох вимірів, зроблених через невеликий інтервал часу.

Дослідження можуть проводитись у будь-якому порядку, але при цьому має бути забезпечений температурний режим роботи відповідно до стандарту ІЕС 60034-1:2010.

Спочатку вимірюється міжфазний опір статора ($R_{||m}$) на постійному струмі, за допомогою омметра з класом точності, не нижчим

за 0,1. При вимірюванні температура обмотки не повинна відрізнятися від температури навколишнього середовища більш ніж на 2 °С. Паралельно з цим необхідним є вимірювання температури за допомогою вимірювачів, похибка яких не повинна перевищувати 1 °С. Інформація про вимірювану температуру використовується надалі для уточнення значень активних опорів, які можуть змінюватися при роботі електродвигуна.

Після цього проводяться дослідження при навантаженні та на холостому ході. Послідовність цих дослідів є довільною, але зазвичай спочатку проводять дослід при навантаженні. В загальному випадку для аналізу зміни величин параметрів ці досліді проводять при навантаженні, що змінюється в діапазоні від 25 % до 125 % від номінального навантаження, але найчастіше використовуються значення параметрів електричних машин при номінальному навантаженні. Враховуючи те, що обробка результатів вимірювань не залежить від величини навантаження, в цій роботі обмежимося розглядом лише номінального режиму роботи. В цьому досліді здійснюється вимірювання напруги на клеммах статора (U_N) та лінійного струму статора (I_N) за допомогою вимірювальних трансформаторів, клас точності яких повинен бути не нижчим 0,2, а вимірювання електричної потужності на вході (P_N) та частоти обертання (n) за допомогою ватметра і тахометра відповідно, клас точності яких повинен бути не нижчим 0,5. Паралельно здійснюється вимірювання температури.

Дослідження на холостому ході здійснюється при підтримуванні навантажувальною електричною машиною синхронної швидкості обертання. При цьому напруга статора може змінюватися в діапазоні від 20 % до 110 % від номінального значення. Кількість точок і конкретний діапазон вимірювання залежать від того, чи є необхідність визначати параметри в усьому діапазоні навантажень, чи лише в деякому. При визначенні параметрів лише для номінального режиму необхідно зробити декілька вимірів таким чином, щоб напруга кола намагнічування відповідала значенням, характерним для номінального режиму. Під час досліджень вимірюються напруга, струм статора, споживана двигуном потужність і температура обмотки. Вимоги щодо класу точності вимірювальних приладів є

такими самими, як і при дослідженні під навантаженням.

Частота напруги статора під час випробувань підтримується сталою і рівною номінальній частоті (f_N) з точністю $\pm 0,3$ %. При необхідності визначення частотних залежностей параметрів частота напруги статора може змінюватись, і для кожного значення частоти досліді під навантаженням та при холостому ході проводяться так само.

Математична обробка результатів вимірювання. Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна проводиться в наступному порядку (наведені формули для розрахунку параметрів еквівалентної схеми заміщення двигунів, обмотки яких з'єднані по типу «зірка»):

1. Розрахунок опору обмотки статора, приведенного до температури 25 °С:

$$R_{S,25^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{2} \cdot R_{\parallel m} \cdot \frac{k_s + 25}{k_s + \theta_0}, \quad (1)$$

де $R_{\parallel m}$ – виміряна величина міжфазового опору статора;

k_s – температурний коефіцієнт статора, який визначається залежно від матеріалу обмотки статора;

θ_0 – виміряна температура холодної обмотки.

2. Розрахунок повного лінійного опору при холостому ході:

$$Z_{NL} = \frac{U_{NL}}{I_{NL} \cdot \sqrt{3}}, \quad (2)$$

де U_{NL} – виміряна напруга на клеммах статора при холостому ході;

I_{NL} – виміряний лінійний струм статора при холостому ході.

3. Розрахунок коефіцієнта потужності при холостому ході:

$$\cos \varphi_{NL} = \frac{P_{NL}}{U_{NL} \cdot I_{NL} \cdot \sqrt{3}}, \quad (3)$$

де P_{NL} – виміряна електрична потужність на вході при холостому ході.

4. Розрахунок активного опору статора при холостому ході:

$$R_{NL} = Z_{NL} \cdot \cos \varphi_{NL}. \quad (4)$$

5. Розрахунок сумарного реактивного опору статора:

$$X_{tS} = \sqrt{Z_{NL}^2 - R_{NL}^2}. \quad (5)$$

6. Розрахунок сумарної індуктивності статора:

$$L_{tS} = \frac{X_{tS}}{2 \cdot \pi \cdot f_N}, \quad (6)$$

де f_N – виміряна частота статора, яка має дорівнювати номінальній.

7. Розрахунок внутрішньої напруги машини (контуру намагнічування):

$$U_{i,NL} = \sqrt{\left(\frac{U_{NL}}{\sqrt{3}} - R_{NL} \cdot I_{NL} \cdot \cos \varphi_{NL}\right)^2 + \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi_{NL})^2} \cdot R_{NL} \cdot I_{NL}\right)^2}. \quad (7)$$

8. Розрахунок потужності постійних втрат:

$$P_k = P_{NL} - 3 \cdot I_{NL}^2 \cdot R_{S,25^\circ C} \cdot \frac{k_s + \theta_{NL}}{k_s + 25}, \quad (8)$$

де θ_{NL} – виміряна температура обмотки.

9. Розрахунок потужності втрат у сталі має враховувати втрати тертя та вентиляційні втрати, але завдяки використанню як навантаження додаткової електричної машини цими втратами можна знехтувати і тоді отримаємо:

$$P_{fe} = P_k. \quad (9)$$

10. Розрахунок еквівалентного опору втрат у сталі для Г-подібної схеми заміщення:

$$R_{fe\Gamma} = \frac{3 \cdot U_{i,NL}^2}{P_{fe}}. \quad (10)$$

11. Розрахунок коефіцієнта потужності у випробуванні під номінальним навантаженням:

$$\cos \varphi_N = \frac{P_N}{U_N \cdot I_N \cdot \sqrt{3}}, \quad (11)$$

де U_N – виміряна напруга на клеммах статора при номінальному навантаженні;

I_N – виміряний лінійний струм статора при номінальному навантаженні;

P_N – виміряна електрична потужність на вході при номінальному навантаженні.

12. Розрахунок номінальної синхронної частоти обертання:

$$n_{syn} = \frac{60 \cdot f_N}{p}, \quad (12)$$

де p – кількість пар полюсів.

13. Розрахунок величини ковзання:

$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}}, \quad (13)$$

де n – виміряна поточна частота обертання.

14. Розрахунок компонентів струму статора:

$$I_{Sa} = I_N \cdot \cos \varphi_N, \quad (14)$$

$$I_{Sb} = -I_N \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_N}. \quad (15)$$

15. Розрахунок міжфазового опору у випробуванні під навантаженням:

$$R_N = R_{lim} \cdot \frac{k_s + \theta_w}{k_s + \theta_0}, \quad (16)$$

де θ_w – виміряна температура обмотки при номінальному навантаженні.

16. Розрахунок внутрішньої напруги машини:

$$U_{ia} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} - \frac{R_N}{2} \cdot I_{Sa}, \quad (17)$$

$$U_{ib} = -\frac{R_N}{2} \cdot I_{Sb}, \quad (18)$$

$$U_i = \sqrt{U_{ia}^2 + U_{ib}^2}. \quad (19)$$

17. Для подальшого розрахунку з досліду холостого ходу необхідно визначити значення сумарної індуктивності статора (L_{tSN}), що відповідає номінальному режиму. У випадку, якщо значення U_i не дорівнює значенню $U_{i,NL}$, яке було отримано з досліду холостого ходу, значення L_{tSN} може бути розраховано шляхом лінійної інтерполяції між двома сусідніми точками на характеристиці отриманої з досліду холостого ходу.

18. Розрахунок сумарного реактивного опору статора:

$$X_{tS} = 2 \cdot \pi \cdot f_N \cdot L_{tSN}. \quad (20)$$

19. Розрахунок приведенного опору втрат у сталі:

$$R'_{fe\Gamma} = R_{fe\Gamma} \cdot \frac{U_i^2}{U_{i,NL}^2}. \quad (21)$$

20. Розрахунок компонентів струму намагнічування:

$$I_{ma} = U_{ia} \cdot \frac{1}{R'_{fe\Gamma}} + U_{ib} \cdot \frac{1}{X_{ts}}, \quad (22)$$

$$I_{mb} = U_{ib} \cdot \frac{1}{R'_{fe\Gamma}} - U_{ia} \cdot \frac{1}{X_{ts}}. \quad (23)$$

21. Розрахунок опору ротора:

$$X'_{t\sigma} = \frac{U_{ib} \cdot (I_{Sa} - I_{ma}) - U_{ia} \cdot (I_{Sb} - I_{mb})}{(I_{Sa} - I_{ma})^2 + (I_{Sb} - I_{mb})^2}. \quad (24)$$

22. Розрахунок індуктивності розсіювання ротора:

$$L'_{t\sigma} = \frac{X'_{t\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_N}. \quad (25)$$

23. Розрахунок значення сумарної індуктивності розсіювання, перетвореного до Г-подібної схеми заміщення:

$$L_{t\sigma} = L'_{t\sigma} \cdot \frac{L_{tSN}}{L_{tSN} + L'_{t\sigma}}. \quad (26)$$

24. Розрахунок індуктивності намагнічування, індуктивності статора, індуктивності ротора:

$$L_m = L_{tSN} - \frac{L_{t\sigma}}{1 + \frac{1}{k_\sigma}}, \quad (27)$$

$$L_{\sigma S} = L_{tSN} - L_m, \quad (28)$$

$$L'_{\sigma r} = L_{t\sigma} - L_{\sigma S}. \quad (29)$$

де k_σ – відношення індуктивності розсіювання статора до індуктивності розсіювання ротора, яке при відсутності проектних даних двигуна для спеціальних машин (з подвійною білячою кліткою або глибокопазовим ротором) приймається як $k_\sigma = 0,67$, або ж для звичайних машин приймається як $k_\sigma = 1$.

25. Розрахунок реактивних опорів:

$$X'_{\sigma r} = 2 \cdot \pi \cdot f_N \cdot L'_{\sigma r}, \quad (30)$$

$$X_{\sigma S} = 2 \cdot \pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma S}, \quad (31)$$

$$X_m = 2 \cdot \pi \cdot f_N \cdot L_m. \quad (32)$$

26. Розрахунок повного лінійного опору:

$$Z = \frac{U_N}{I_N \cdot \sqrt{3}}. \quad (33)$$

27. Розрахунок лінійного реактивного опору:

$$X = Z \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_N}. \quad (34)$$

28. Розрахунок опору ротора при робочій температурі θ_L :

$$R'_{r,\theta_L} = s \cdot (X'_{\sigma r} + X_m) \times \sqrt{\frac{X_m \cdot X'_{\sigma r}}{X_m + X'_{\sigma r}} - (X - X_{\sigma S})^2} \cdot \frac{1}{X - X_{\sigma S} - X_m}. \quad (35)$$

29. Розрахунок опору ротора при температурі 25 °C:

$$R'_{r,25^\circ C} = R'_{r,\theta_L} \cdot \frac{k_r + 25}{k_r + \theta_L}. \quad (36)$$

30. Розрахунок еквівалентного опору втрат у сталі для Т-подібної схеми заміщення:

$$R_{fe} = R_{fe\Gamma} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{\sigma S}}{X_m}\right)^2}. \quad (37)$$

Результати досліджень

Визначення похибок вимірювання параметрів двигуна. Для розрахунку похибок вимірювань скористаємось підходом, який наведено в [17]. Стандарт лише визначає вимоги до класу точності (γ) вимірювальних приладів, тому при проведенні досліджень необхідно спочатку визначити абсолютну похибку прямих вимірювань. Ця похибка залежатиме від класу точності та нормованого значення межі вимірювань ($X_{норм}$).

Після визначення похибок прямих вимірювань можна розрахувати похибки непрямих вимірювань згідно з (38). Розрахунок похибок непрямих вимірювань будемо здійснювати послідовно в порядку, що відповідає порядку розрахунку значень параметрів схеми заміщення електричної машини.

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{df}{dx_i} \right)^2} \cdot \Delta x_i^2, \quad (38)$$

де x_i – виміряна величина;

Δx_i – абсолютна похибка величини.

Отримані аналітичні вирази для розрахунку похибок вимірювання наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Аналітичні вирази для розрахунку абсолютних похибок вимірювання параметрів схем заміщення асинхронного двигуна

Параметр	Абсолютна похибка
Похибки прямих вимірювань	
Міжфазовий опір статора	$\Delta R_{\parallel m} = \frac{\gamma \cdot R_{\text{норм}}}{100}$, де γ не менше ніж 0,1
Температура обмотки	$\Delta \theta = 1^\circ \text{C}$
Напруга на клеммах статора	$\Delta U = \frac{\gamma \cdot U_{\text{норм}}}{100}$, де γ не менше ніж 0,2
Лінійний струм статора	$\Delta I = \frac{\gamma \cdot I_{\text{норм}}}{100}$, де γ не менше ніж 0,2
Електрична потужність на вході	$\Delta P = \frac{\gamma \cdot P_{\text{норм}}}{100}$, де γ не менше ніж 0,5
Поточна частота обертання	$\Delta n = \frac{\gamma \cdot n_{\text{норм}}}{100}$, де γ не менше ніж 0,5
Номінальна частота	$\Delta f_N = \frac{0,3}{100} \cdot f_N$
Похибки непрямих вимірювань	
Опір обмотки статора, (1)	$\Delta R_{s, 25^\circ \text{C}} = \frac{k_s + 25}{2 \cdot (k_s + \theta_0)} \sqrt{\Delta R_{\parallel m}^2 + \left(\frac{R_{\parallel m}}{k_s + \theta_0} \right)^2 \cdot \Delta \theta^2}$
Повний лінійний опір, (2)	$\Delta Z_{NL} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot I_{NL}} \sqrt{\Delta U^2 + \left(\frac{U_{NL}}{I_{NL}} \right)^2 \cdot \Delta I^2}$
Коефіцієнт потужності у випробуванні на холостому ході, (3)	$\Delta \cos \varphi_{NL} = \frac{\sqrt{3}}{3 \cdot U_{NL} \cdot I_{NL}} \sqrt{\Delta P^2 + \left(\frac{P_{NL}}{U_{NL}} \right)^2 \cdot \Delta U^2 + \left(\frac{P_{NL}}{I_{NL}} \right)^2 \cdot \Delta I^2}$
Активний опір статора, (4)	$\Delta R_{NL} = \sqrt{\cos^2 \varphi_{NL} \cdot \Delta Z_{NL}^2 + Z_{NL}^2 \cdot \Delta \cos^2 \varphi_{NL}}$
Сумарний реактивний опір статора, (5)	$\Delta X_{tS} = \frac{1}{\sqrt{Z_{NL}^2 - R_{NL}^2}} \sqrt{(Z_{NL})^2 \cdot \Delta Z_{NL}^2 + (R_{NL})^2 \cdot \Delta R_{NL}^2}$
Сумарна індуктивність статора, (6)	$\Delta L_{tS} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_N} \sqrt{\Delta X_{tS}^2 + \left(\frac{X_{tS}}{f_N} \right)^2 \cdot \Delta f_N^2}$
Внутрішня напруга машини (контуру намагнічування), (7)	$\Delta U_{i,NL} = \frac{\sqrt{\left(U_{NL} - \sqrt{3} \cdot I_{NL} \cdot R_{NL} \cdot \cos \varphi_{NL} \right)^2 \cdot \Delta U^2 + \left(3 \cdot I_{NL}^2 \cdot R_{NL} - \sqrt{3} \cdot I_{NL} \cdot U_{NL} \cdot \cos \varphi_{NL} \right)^2 \cdot \Delta R_{NL}^2 + \left(3 \cdot I_{NL} \cdot R_{NL}^2 - \sqrt{3} \cdot R_{NL} \cdot U_{NL} \cdot \cos \varphi_{NL} \right)^2 \cdot \Delta I^2 + \left(\sqrt{3} \cdot I_{NL} \cdot R_{NL} \cdot U_{NL} \right)^2 \cdot \Delta \cos^2 \varphi_{NL}}}{3 \cdot \sqrt{I_{NL}^2 \cdot R_{NL}^2 - 2 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_{NL} \cdot I_{NL} \cdot R_{NL} \cdot \cos \varphi_{NL}}{3} + \frac{U_{NL}^2}{3}}}$

Продовження таблиці 1

Параметр	Абсолютна похибка
Постійні втрати, (8)	$\Delta P_k = \sqrt{\Delta P^2 + \left(\frac{6 \cdot I_{NL} \cdot R_{S,25^\circ C} \cdot (k_s + \theta_{NL})}{k_s + 25} \right)^2 \cdot \Delta I^2 + \left(\frac{3 \cdot I_{NL}^2 \cdot (k_s + \theta_{NL})}{k_s + 25} \right)^2 \cdot \Delta R_{S,25^\circ C}^2 + \left(\frac{3 \cdot I_{NL}^2 \cdot R_{S,25^\circ C}}{k_s + 25} \right)^2 \cdot \Delta \theta^2}$
Втрати в сталі, (9)	$\Delta P_{fe} = \Delta P_k$
Еквівалентний опір втрат у сталі для Г-подібної схеми заміщення, (10)	$\Delta R_{fe\Gamma} = \frac{3 \cdot U_{i,NL}}{P_{fe}} \sqrt{4 \cdot \Delta U_{i,NL}^2 + \left(\frac{U_{i,NL}}{P_{fe}} \right)^2 \cdot \Delta P_{fe}^2}$
Коефіцієнт потужності у випробуванні на номінальному навантаженні, (11)	$\Delta \cos \varphi_N = \frac{\sqrt{\Delta P^2 + \left(\frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} \right)^2 \cdot \Delta U^2 + \left(\frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} \right)^2 \cdot \Delta I^2}}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N}$
Номінальна синхронна частота обертання, (12)	$\Delta n_{syn} = \frac{60}{p} \cdot \Delta f_N$
Величина ковзання, (13)	$\Delta s = \frac{1}{n_{syn}} \sqrt{\left(\frac{n}{n_{syn}} \right)^2 \cdot \Delta n_{syn}^2 + \Delta n^2}$
Компонент струму, (14)	$\Delta I_{Sa} = \sqrt{(\cos \varphi_N)^2 \cdot \Delta I^2 + (I_N)^2 \cdot \Delta \cos \varphi_N^2}$
Компонент струму, (15)	$\Delta I_{Sb} = \sqrt{(1 - \cos \varphi_N^2) \cdot \Delta I^2 + \left(\frac{I_N \cdot \cos \varphi_N}{\sqrt{1 - \cos \varphi_N^2}} \right)^2 \cdot \Delta \cos \varphi_N^2}$
Міжфазовий опір, (16)	$\Delta R_N = \frac{k_s + \theta_w}{k_s + \theta_0} \sqrt{\Delta R_{lm}^2 + \left(\frac{R_{lm}}{k_s + \theta_0} \right)^2 + \left(\frac{R_{lm}}{k_s + \theta_w} \right)^2} \cdot \Delta \theta^2$
Компонент внутрішньої напруги машини, (17)	$\Delta U_{ia} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \Delta U^2 + \left(\frac{I_{Sa}}{2} \right)^2 \cdot \Delta R_N^2 + \left(\frac{R_N}{2} \right)^2 \cdot \Delta I_{Sa}^2}$
Компонент внутрішньої напруги машини, (18)	$\Delta U_{ib} = \sqrt{\left(\frac{I_{Sb}}{2} \right)^2 \cdot \Delta R_N^2 + \left(\frac{R_N}{2} \right)^2 \cdot \Delta I_{Sb}^2}$
Внутрішня напруга машини, (19)	$\Delta U_i = \frac{\sqrt{U_{ia}^2 \cdot \Delta U_{ia}^2 + U_{ib}^2 \cdot \Delta U_{ib}^2}}{\sqrt{U_{ia}^2 + U_{ib}^2}}$
Сумарний реактивний опір статора, (20)	$\Delta X_{tS} = \sqrt{(2 \cdot \pi \cdot L_{tSN})^2 \cdot \Delta f_N^2 + (2 \cdot \pi \cdot f_N)^2 \cdot \Delta L_{tSN}^2}$
Приведений опір втрат у сталі, (21)	$\Delta R'_{fe\Gamma} = \frac{U_i^2}{U_{i,NL}^2} \sqrt{\Delta R_{fe\Gamma}^2 + \left(\frac{2 \cdot R_{fe\Gamma}}{U_i} \right)^2 \cdot \Delta U_i^2 + \left(\frac{2}{U_{i,NL}} \right)^2 \cdot \Delta U_{i,NL}^2}$

Продовження таблиці 1

Параметр	Абсолютна похибка
Компонент струму намагнічування, (22)	$\Delta I_{ma} = \sqrt{\left(\frac{1}{R'_{fe\Gamma}}\right)^2 \cdot \Delta U_{ia}^2 + \left(\frac{U_{ia}}{R'_{fe\Gamma}}\right)^2 \cdot \Delta R_{fe\Gamma}^2 + \left(\frac{1}{X_{ts}}\right)^2 \cdot \Delta U_{ib}^2 + \left(\frac{U_{ib}}{X_{ts}}\right)^2 \cdot \Delta X_{ts}^2}$
Компонент струму намагнічування, (23)	$\Delta I_{mb} = \sqrt{\left(\frac{1}{X_{ts}}\right)^2 \cdot \Delta U_{ia}^2 + \left(\frac{U_{ib}}{R'_{fe\Gamma}}\right)^2 \cdot \Delta R_{fe\Gamma}^2 + \left(\frac{1}{R'_{fe\Gamma}}\right)^2 \cdot \Delta U_{ib}^2 + \left(\frac{U_{ia}}{X_{ts}}\right)^2 \cdot \Delta X_{ts}^2}$
Опір ротора, (24)	$\Delta X'_{t\sigma} = \frac{\sqrt{b_1^2 \cdot \Delta U_{ia}^2 + a_1^2 \cdot \Delta U_{ib}^2 + \left(U_{ib} + \frac{2 \cdot a_1 \cdot (U_{ia} \cdot b_1 - U_{ib} \cdot a_1)}{a_1^2 + b_1^2}\right)^2 \cdot \Delta I_{Sa}^2 + \left(U_{ia} + \frac{2 \cdot b_1 \cdot (U_{ia} \cdot b_1 - U_{ib} \cdot a_1)}{a_1^2 + b_1^2}\right)^2 \cdot \Delta I_{Sb}^2 + \left(\frac{2 \cdot a_1 \cdot (U_{ib} \cdot a_1 - U_{ia} \cdot b_1)}{a_1^2 + b_1^2} - U_{ib}\right)^2 \cdot \Delta I_{ma}^2 + \left(U_{ia} + \frac{2 \cdot b_1 \cdot (U_{ib} \cdot a_1 - U_{ia} \cdot b_1)}{a_1^2 + b_1^2}\right)^2 \cdot \Delta I_{mb}^2}}{a_1^2 + b_1^2}$ де $a_1 = I_{Sa} - I_{ma}$, $b_1 = I_{Sb} - I_{mb}$
Індуктивність розсіювання ротора, (25)	$\Delta L'_{t\sigma} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_N} \sqrt{\Delta X_{t\sigma}'^2 + \left(\frac{X'_{t\sigma}}{f_N}\right)^2 \cdot \Delta f_N^2}$
Сумарна індуктивність розсіювання, перетворена на Г-подібну схему заміщення, (26)	$\Delta L_{t\sigma} = \frac{\sqrt{\left(L_{tSN}'^2\right)^2 \cdot \Delta L_{t\sigma}'^2 + \left(L_{t\sigma}'^2\right)^2 \cdot \Delta L_{tSN}^2}}{\left(L_{t\sigma}' + L_{tSN}\right)^2}$
Індуктивність намагнічування, (27)	$\Delta L_m = \sqrt{\Delta L_{tSN}^2 + \left(\frac{k_\sigma}{1 + k_\sigma}\right)^2 \cdot \Delta L_{t\sigma}^2}$
Індуктивність статора, (28)	$\Delta L_{\sigma S} = \sqrt{\Delta L_{tSN}^2 + \Delta L_m^2}$
Індуктивність ротора, (29)	$\Delta L'_{\sigma r} = \sqrt{\Delta L_{t\sigma}^2 + \Delta L_{\sigma S}^2}$
Реактивний опір ротора, (30)	$\Delta X'_{\sigma r} = \sqrt{\left(2 \cdot \pi \cdot L'_{\sigma r}\right)^2 \cdot \Delta f_N^2 + \left(2 \cdot \pi \cdot f_N\right)^2 \cdot \Delta L_{\sigma r}'^2}$

Закінчення таблиці 1

Параметр	Абсолютна похибка
Реактивний опір статора, (31)	$\Delta X_{\sigma s} = \sqrt{(2 \cdot \pi \cdot L_{\sigma s})^2 \cdot \Delta f_N^2 + (2 \cdot \pi \cdot f_N)^2 \cdot \Delta L_{\sigma s}^2}$
Реактивний опір намагнічування, (32)	$\Delta X_m = \sqrt{(2 \cdot \pi \cdot L_m)^2 \cdot \Delta f_N^2 + (2 \cdot \pi \cdot f_N)^2 \cdot \Delta L_m^2}$
Повний лінійний опір, (33)	$\Delta Z = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{3}}{3 \cdot I_N}\right)^2 \cdot \Delta U^2 + \left(\frac{\sqrt{3} \cdot U_N}{3 \cdot I_N^2}\right)^2 \cdot \Delta I^2}$
Лінійний реактивний опір, (34)	$\Delta X = \sqrt{\left(\sqrt{1 - \cos \varphi_N^2}\right) \cdot \Delta Z^2 + \left(\frac{Z \cdot \cos \varphi_N}{\sqrt{1 - \cos \varphi_N^2}}\right)^2 \cdot \Delta \cos \varphi_N^2}$
Опір ротора, (35)	$\Delta R'_{r, \theta_L} = \frac{\sqrt{\left(\frac{a_5}{b_5} \cdot (X_m + X'_{\sigma r})\right)^2 \cdot \Delta s^2 + \left(\frac{s}{2} \cdot \left(\frac{a_5}{b_5} - X_m - X'_{\sigma r}\right)\right)^2 \cdot \Delta X_{\sigma r}'^2 + \left(\frac{s}{2} \cdot \left(\frac{a_5}{b_5} + \frac{a_5 + (X'_{\sigma r} - X + X_{\sigma s}) \cdot b_5}{b_5^2} \cdot (X_m + X'_{\sigma r})\right)\right)^2 \cdot \Delta X_m^2 + \left(\frac{s}{2} \cdot \left(\frac{a_5}{b_5^2} \cdot (X_m + X'_{\sigma r}) + \frac{(X_m + X'_{\sigma r})^2}{b_5}\right)\right)^2 \cdot (\Delta X^2 + \Delta X_{\sigma s}^2)}}{\sqrt{\frac{a_5}{b_5} \cdot (X_m + X'_{\sigma r})}}$ $a_5 = X_m \cdot X'_{\sigma r} - (X - X_{\sigma s}) \cdot (X'_{\sigma r} + X_m), b_5 = X - X_{\sigma s} - X_m$
Опір ротора, приведений до стандартної температури, (36)	$\Delta R'_{r, 25^\circ C} = \frac{k_s + 25}{k_s + \theta_L} \sqrt{\Delta R_{r, \theta_L}^2 + \left(\frac{R'_{r, \theta_L}}{k_s + \theta_L}\right)^2 \cdot \Delta \theta^2}$
Еквівалентний опір втрат у сталі для Т-подібної схеми заміщення, (37)	$\Delta R_{fe} = \frac{\sqrt{\Delta R_{fe\Gamma}^2 + \left(\frac{2 \cdot R_{fe\Gamma}}{X_m \cdot \left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)}\right)^2 \cdot \left(\Delta X_{\sigma s}^2 + \left(\frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)^2 \cdot \Delta X_m^2\right)}}{\left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)^2}$

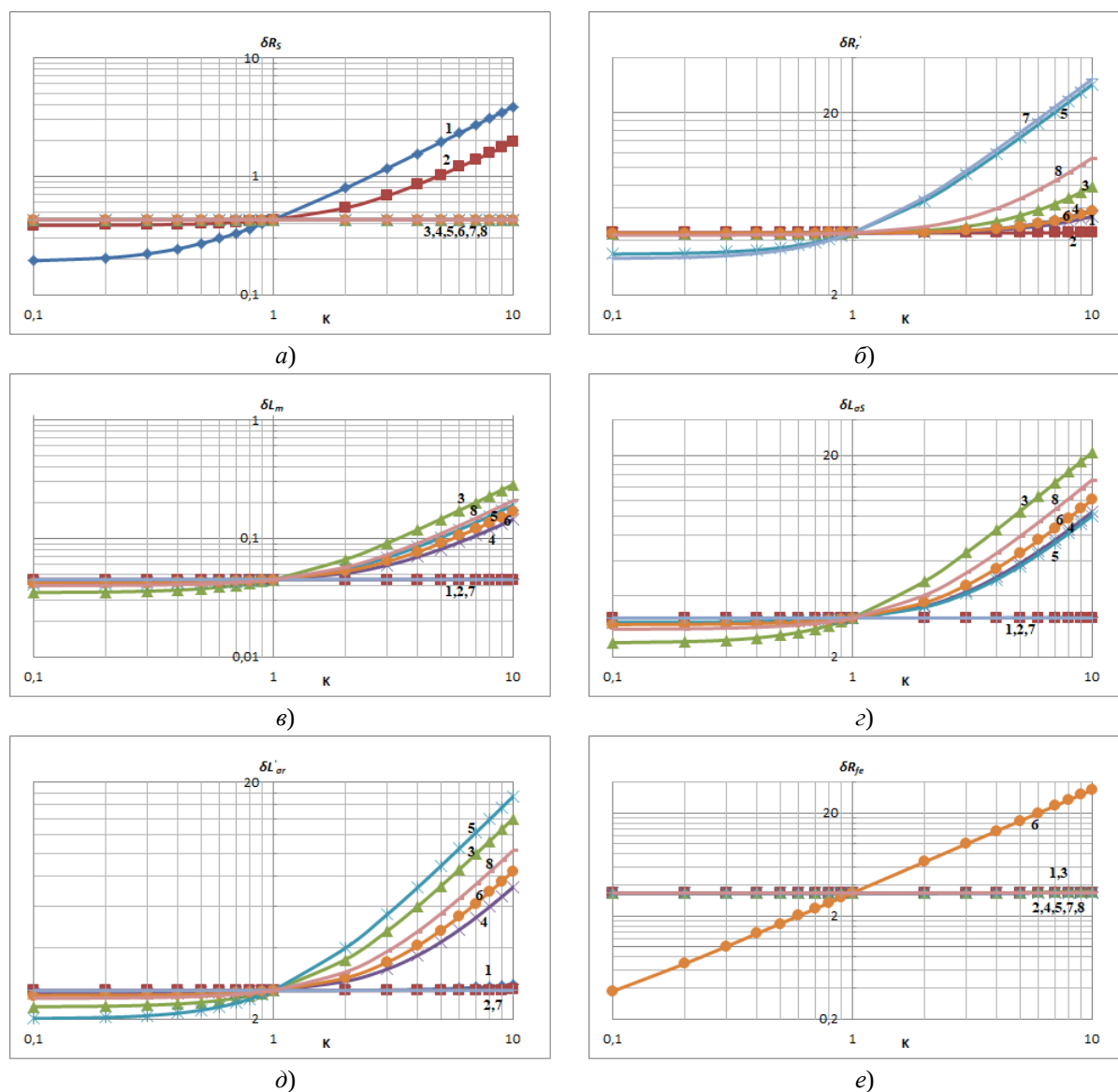
Оцінка впливу похибок прямих вимірювань на точність визначення параметрів двигуна. Послідовний розрахунок з використанням отриманих виразів дає змогу оцінити очікувану похибку визначення параметрів ще на етапі, що передуює безпосередньо дослідженням. Для оцінки впливу похибок вимірюваних приладів були виконані чисельні експерименти з розрахунку значень параметрів та значень похибок для двигуна типу 4A160M4Y3, довідникові параметри якого в

номінальному режимі мають значення: $R_s = 0.264$ Ом, $R_r' = 0.151$ Ом, $L_m = 0.088$ Гн, $L_{\sigma s} = 0.0017$ Гн, $L_{\sigma r}' = 0.0026$ Гн, $R_{fe} = 438$ Ом. В номінальному режимі: фазна напруга $U_n = 220$ В, фазний струм $I_n = 32$ А, потужність $P_n = 19.37$ кВт, частота обертання $n = 1467$ об/хв. В режимі холостого ходу: фазна напруга $U_{xx} = 220$ В, фазний струм $I_{xx} = 7.46$ А, потужність $P_{xx} = 343$ Вт, частота обертання $n_{xx} = 1500$ об/хв.

Враховуючи те, що потужності, споживані двигуном у номінальному режимі та в режимі холостого ходу, різняться в десятки разів, вимірювання цих величин не може здійснюватися з однаковою абсолютною похибкою, що потребує використання або різних вимірювальних приладів, або приладів зі змінюваною шкалою.

Для аналізу впливу зміни похибок вимірювальних приладів на точність визначення параметрів розглянемо базовий випадок, при якому абсолютні похибки прямих вимірювань мають такі значення: $\Delta T = 1^\circ\text{C}$, $\Delta R = 0.001\ \Omega$, $\Delta U = 0.1\ \text{В}$, $\Delta I = 0.001\ \text{А}$, $\Delta P_n = 100\ \text{Вт}$,

$\Delta P_{xx} = 10\ \text{Вт}$, $\Delta n = 1\ \text{об/хв}$, $\Delta f = 0.01\ \text{Гц}$. За цих умов отримаємо абсолютні похибки визначення параметрів двигуна і для зручності розрахуємо їх відносні похибки: $\delta R_s = 0.429\ \%$, $\delta R_r' = 4.369\ \%$, $\delta L_m = 0.045\ \%$, $\delta L_{\sigma s} = 3.116\ \%$, $\delta L_{\sigma r}' = 2.638\ \%$, $\delta R_{fe} = 3.346\ \%$. Далі розглянемо залежності їх зміни, почергово помножуючи кожен з похибок прямих вимірювань на коефіцієнт K , який прийматиме значення в діапазоні від 0.1 до 10. Результати зображено на рисунку 2. На рисунку цифрами позначено залежності, що відповідають зміні похибок прямих вимірювань, таким чином: 1 – ΔT , 2 – ΔR , 3 – ΔU , 4 – ΔI , 5 – ΔP_n , 6 – ΔP_{xx} , 7 – Δn , 8 – Δf .



похибки визначення параметрів: а) δR_s , б) $\delta R_r'$, в) δL_m , г) $\delta L_{\sigma s}$, д) $\delta L_{\sigma r}'$, е) δR_{fe}

Рисунок 2 – Залежність зміни похибок визначення параметрів при зміні похибок вимірювальних приладів

Обговорення результатів. Аналізуючи отримані результати, відзначимо наступне:

- точність визначення індуктивності намагнічування порівняно з іншими параметрами найменше залежить від похибок вимірювальних приладів і практично не залежить від похибок вимірювання опору статора, температури та частоти обертання;
- точність визначення опору обмотки статора залежить лише від похибок вимірювання температури та опору статора і не залежить від вимірювання інших параметрів;
- точність визначення опору, що враховує втрати енергії в сталі двигуна, майже лінійно залежить від похибки вимірювання потужності холостого ходу та майже не залежить від вимірювання інших параметрів;
- точність визначення опору обмотки ротора майже не залежить від похибок вимірювання температури та опору статора, а найбільше залежить від похибок вимірювання частоти обертання та потужності в номінальному режимі;
- точність визначення індуктивностей розсіювання статора та ротора майже не залежить від похибок вимірювання опору статора, температури та частоти обертання, а залежить від вимірювання інших параметрів є співрозмірною.

Висновки. В роботі визначено методику тестових досліджень асинхронних двигунів та порядок опрацювання їх результатів для розрахунку параметрів схем заміщення двигуна в номінальному режимі роботи. Знайдено аналітичні вирази для розрахунку абсолютних похибок оцінювання параметрів і проаналізовано вплив похибок прямих вимірювань на точність визначення параметрів двигуна.

Наукова новизна полягає в отриманні аналітичних залежностей похибок визначення параметрів двигуна та визначенні впливу похибок вимірювальних приладів на кінцеву точність оцінки параметрів двигуна.

Практична цінність полягає в розробці методики оцінки параметрів двигуна, використання якої дає змогу оцінити очікувану точність визначення параметрів до проведення досліджень та сформулювати вимоги до вимірювальних приладів, використання яких дозволить визначати параметри з заданою точністю.

Подальші дослідження варто присвятити оцінці похибок інших методів визначення параметрів електричних двигунів та їх порівняльному аналізу.

Список використаних джерел

- [1] Austin Hughes, *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications*. Third ed. Elsevier Ltd., 2006.
- [2] М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков та ін., *Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи*: навч. посіб., М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, Ред. Київ, Україна: Либідь, 2005.
- [3] М. А. Яцун, *Електричні машини*. Львів, Україна: Вид-во Львів. політехніки, 2011.
- [4] М. О. Осташевський, та О. Ю. Юр'єва, *Електричні машини та трансформатори*: навч. посіб., д.т.н., проф. В. І. Міліх, Ред.. Київ, Україна: Каравела, 2018.
- [5] Г. Г. Пивняк, и А. В. Волков, *Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией*. Днепропетровск, Украина: НГУ, 2006.
- [6] М. В. Загірняк, В. Б. Клепиков, С. М. Ковбаса та ін. *Енергоефективні електромеханічні системи широкого технологічного призначення*: монографія. Київ, Україна: Ін-т електродинаміки НАН України, 2018.
- [7] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*. Springer, 2001.
- [8] R. Ramanujam. *Modeling and Analysis of Electrical Machine*. I K International Publishing House, 2018.
- [9] О. П. Чорний, А. В. Луговой, Д. Й. Родькін, Г. Ю. Сисюк, та О. В. Садовой, *Моделювання електромеханічних систем*: підручник. Кременчук, Україна, 2001.
- [10] P. Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*. Oxford, New York: Oxford University Press, 1993.
- [11] J. Tang, Y. Yang, F. Blaabjerg, J. Chen, L. Diao, and Z. Liu, *Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors: A review*, *Energies*, vol. 11, p. 2194, 2018. doi: 10.3390/en11092194.
- [12] J. J. Guedes, M. F. Castoldi, A. Goedel, C. M. Agulhari, and D. S. Sanches, "Parameters estimation of three-phase induction motors using differential evolution", *Electric Power Systems Research*, vol. 154, pp. 204-212, 2018.
- [13] S. Yang, D. Ding, X. Li, Z. Xie, X. Zhang, and L. Chang, "A novel online parameter estimation method for indirect field oriented

- induction motor drives", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 32, pp. 1562-1573, 2017.
- [14] С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса, и Д. Л. Приступа, "Алгоритм идентификации электрических параметров асинхронного двигателя на основе адаптивного наблюдателя полного порядка: синтез и экспериментальное тестирование", *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, № 34, с. 27-34, 2013.
- [15] А. П. Черный, Д. И. Родькин А. П. Калинин, и О. С. Воробейчик, *Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем*: монография. Кременчуг, Украина: ЧП Щербатых А.В., 2008.
- [16] IEC 60034-28:2013. *Rotating electrical machines - Part 28: Test methods for determining quantities of equivalent circuit diagrams for three-phase low-voltage cage induction motors*.
- [17] В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, та В. В. Грабко, *Основи метрології та електричних вимірювань*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2012.
- [7] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*. Springer, 2001.
- [8] R. Ramanujam. *Modeling and Analysis of Electrical Machine*. I K International Publishing House, 2018.
- [9] O. P. Chorny, A. V. Luhovoy, D. Y. Rod'kin, H. Yu. Sysyuk, and O. V. Sadovoy, *Modeling of Electromechanical Systems*: textbook. Kremenichuk, Ukraine, 2001 [in Ukrainian].
- [10] P. Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*. Oxford, New York: Oxford University Press, 1993.
- [11] J. Tang, Y. Yang, F. Blaabjerg, J. Chen, L. Diao, and Z. Liu, *Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors: A review*, *Energies*, vol. 11, p. 2194, 2018. doi: 10.3390/en11092194.
- [12] J. J. Guedes, M. F. Castoldi, A. Goedel, C. M. Agulhari, and D. S. Sanches, "Parameters estimation of three-phase induction motors using differential evolution", *Electric Power Systems Research*, vol. 154, pp. 204-212, 2018.
- [13] S. Yang, D. Ding, X. Li, Z. Xie, X. Zhang, and L. Chang, "A novel online parameter estimation method for indirect field oriented induction motor drives", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 32, pp. 1562-1573, 2017.
- [14] S. M. Peresada, S. N. Kovbasa, and D. L. Pristupa, "Algorithm for identification of electrical parameters of an induction motor based on a full-order adaptive observer: Synthesis and experimental testing", *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, no. 34, pp. 27-34, 2013 [in Russian].
- [15] A. P. Chernyy, D. I. Rod'kin A. P. Kalinov, and O. S. Vorobeychik, *Monitoring of Parameters of Electric Motors of Electromechanical Systems*: monograph. Kremenichuk, Ukraine: ChP Shcherbatykh A.V., 2008 [in Russian].
- [16] IEC 60034-28:2013. *Rotating electrical machines - Part 28: Test methods for determining quantities of equivalent circuit diagrams for three-phase low-voltage cage induction motors*.
- [17] V. V. Kukharchuk, V. Yu. Kucheruk, Ye. T. Volodars'kyi, and V. V. Hrabko, *Fundamentals of Metrology and Electrical Measurements*. Vinnytsia, Ukraine: VNTU, 2012 [in Ukrainian].

References

- [1] Austin Hughes, *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications*. Third ed. Elsevier Ltd., 2006.
- [2] M. G. Popovich, O. Yu. Lozynsky, V. B. Klepikov et al., *Electromechanical Automatic Control Systems and Electric Drives*: textbook. Kyiv, Ukraine: Lybid', 2005 [in Ukrainian].
- [3] M. A. Yatsun, *Electric Machines*. Lviv, Ukraine: Vyd-vo Lviv. politekhniky, 2011 [in Ukrainian].
- [4] M. O. Ostashevs'kyi, and O. Yu. Yurieva, *Electric Machines and Transformers*: textbook, prof. V. I. Milykh, Ed. Kyiv, Ukraine: Karavela, 2018 [in Ukrainian].
- [5] G. G. Pivnyak, and A. V. Volkov, *Modern Frequency-Controlled Asynchronous Electric Drives with Pulse-Width Modulation*. Dnepropetrovsk, Ukraine: NGU, 2006 [in Russian].
- [6] M. V. Zahirnyak, V. B. Klepikov, S. M. Kovbasa et al., *Energy Efficient Electromechanical Systems for a Wide Range of Technological Purposes*: monograph. Kyiv, Ukraine: In-t elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2018 [in Ukrainian].

V. D. Zakharchenko¹, Graduate Student,
e-mail: vladyslav.zakharchenko1@gmail.com
M. V. Dobrolyubova², Ph. D., Associate Professor,
e-mail: m.dobrolyubova@kpi.ua
O. V. Statsenko², Ph. D., Associate Professor,
e-mail: o.statsenko@kpi.ua
K. L. Shevchenko², Dr. Sc., Associate Professor
e-mail: k.shevchenko@kpi.ua
¹LLC "REATISS"
Kazimir Malevich st., 15, Kyiv, 02000, Ukraine
²National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

ESTIMATION OF ERRORS IN EXPERIMENTAL STUDY OF INDUCTION MOTOR PARAMETERS

The article is devoted to solving the problem of analyzing the influence of errors of measuring instruments used during standardized tests of induction electric motors on the accuracy of estimating the parameters of substitution schemes of these motors.

Statement of the problem. To ensure the efficient use of induction motors in adjustable electric drives, it is necessary to obtain information about the parameters of their substitution schemes.

Analysis of recent research and publications. There are various methods for estimation of induction motor parameters, the use of which involves the creation of specified conditions and the use of appropriate equipment. But the basic approach is to use the methods given in the international standard IEC 60034-28: 2013. The main disadvantage of these standard methods is the lack of influence of metrological characteristics of measuring equipment on the accuracy of parameter determination.

The purpose of the article is to determine the methodology of research and mathematical processing of results for calculating the parameters of substitution schemes of induction motors, as well as to estimate the impact of errors in measuring instruments on the accuracy of parameter determination.

Results. In accordance with international standards, the article defines the methodology and sequence of experimental studies of induction motors required to estimate the parameters of substitution schemes in the nominal mode. Also in the article the algorithm of calculation of motor parameters is developed and analytical expressions for calculation of absolute errors of estimation of these parameters are received. The influence of errors of direct measurements on the accuracy of determining the parameters of an induction motor is also analyzed.

Conclusion. The obtained results make it possible to determine the requirements for measuring equipment before conducting research of induction motors, which will increase the accuracy of estimating the parameters of induction motors.

Keywords: measurement errors, induction motor, direct and indirect measurements.

[0000-0002-8342-3011] **О. О. Онищук**, канд. техн. наук, доцент
e-mail: oksanaduda2013@gmail.com

Волинський національний університет імені Лесі Українки
Потапова, 9, м. Луцьк, 43000, Україна

ОПТИМІЗОВАНИЙ РОЗРАХУНОК АДСОРБЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ ЧЕРЕЗ НАСАДКОВИЙ АДСОРБЕР МЕТОДОМ КОМІРКОВОЇ МОДЕЛІ

В статті показано оптимізовану модель адсорбції через насадковий адсорбер в ізотермічних умовах. Розглянуто теоретичні розрахунки кінетики адсорбції, часу перебування потоку в насадковому адсорбері, часу захисної дії шару адсорбенту, середньої швидкості процесу адсорбції. Представлено в граничних умовах диференціальне рівняння адсорбційного процесу в ізотермічних умовах. Крім того, визначено кількість теплоти згідно з законом Ленгмюра при адсорбції на активованому вугіллі, та, використовуючи рівняння Трутона, визначено залежність кількості тепла, що поглинається, від температури. Наведено математичну модель адсорбційного процесу, що досліджувалась із застосуванням методу коміркової моделі та програмного забезпечення. Використовуючи пакет прикладних програм MathCAD та рівняння Ленгмюра, ця модель розв'язана шляхом порівняння необхідної кількості комірок n , яка була визначена як її основний параметр. На основі експериментальної кривої зроблено припущення про можливий вигляд коміркової моделі адсорбційного процесу і проведено математичну обробку цієї кривої. Розраховано отримані значення параметрів моделі, проведено нормування експериментальних даних методом трапецій та перевірку моделі на адекватність. Вивчено процес обміну іонів з однаковим зарядом, який проходить між адсорбентом і адсорбатом в точно еквівалентних співвідношеннях, для того щоб пом'якшити воду, яка призначена для виготовлення безалкогольних і алкогольних напоїв, виноматеріалів, оскільки смакові якості цих продуктів поліпшуються в разі зменшення в них іонів магнію, міді, заліза.

Ключові слова: адсорбція, математична модель, теплові процеси, коміркова модель, метод трапецій, MathCAD.

Вступ. Створення сучасних технологій і матеріалів очищення розчинів потребує вивчення механізмів кінетики та інтенсифікації адсорбційного масопереносу у неоднорідних середовищах різної природи і вимагає розвитку нових підходів у моделюванні. Новітні методи дозволятимуть описувати внутрішню кінетику процесу у нестационарних режимах на масообмінних поверхнях.

Проблеми математичного моделювання адсорбційного процесу в неоднорідних пористих середовищах та методи побудови математичних задач таких моделей розглянуто у працях авторів [1-4], а також досліджуються у працях М. П. Ленюка [5], І. В. Сергієнка, В. В. Скопечького, В. С. Дейнеки [8], J. Fraissard, M. A. Springuel-Huet, P. N'Gokoli-Kekele [9].

Асорбційні процеси піддаються найбільш складному математичному опису вна-

слідок великого різноманіття кінетичних факторів, що супроводжують дифузію сорбата в макро-, мезо- і мікропорах сорбенту, і необхідності врахування як специфічних характеристик самого сорбенту (наприклад, склад і властивості активних центрів, умови регенерації), так і особливостей взаємодії в конкретній системі адсорбент–адсорбат і на стадії адсорбції, і на стадії регенерації.

У зв'язку з цим становить інтерес розробка математичної моделі адсорбційного процесу в ізотермічних умовах [1].

Оскільки адсорбційний об'єм пор адсорбенту найповніше використовується при рівних концентраціях, то найбільш ефективним є застосування адсорбції для очищення води з розчинністю, що наближається до цієї граничної величини, тобто за умови $C_s/C_{H_2O} \leq 0,001$ [7, 8].

Пориста структура промислових адсорбентів не тільки визначає граничний об'єм їх адсорбційного простору або максимальну питому кількість адсорбованої речовини, але й впливає певною мірою на вибірковість адсорбції компонентів розчину [9].

Математичну модель адсорбційного процесу можна скласти до проведення експерименту, виходячи з конструкції та принципу дії об'єкта хімічної технології. В такому випадку задача дослідження об'єкта полягатиме у підтвердженні типової гідродинамічної моделі і розрахунку її параметрів. Типовими гідродинамічними моделями є дві ідеалізовані – ідеального змішування та ідеального витіснення, а також моделі, які з достатньою точністю описують реальні процеси: дифузійна, коміркова та комбінована [8-10].

Одним із ефективних методів визначення та розрахунку параметрів гідродинамічних моделей є експериментальне дослідження впливу об'єкта хімічної технології на процеси у початковому потоці. Для цього дослідження необхідно в наведених умовах представити диференціальне рівняння адсорбційного процесу згідно з початковими і граничними умовами та графічно зобразити задані залежності у безрозмірних координатах, що демонструють математичну модель заданого процесу. Згідно з методикою доцільно обчислити кількість комірок та порівняти експериментально одержану криву відгуку з кривими, розрахованими згідно з рівнянням коміркової моделі при різноманітних значеннях.

Мета статті та дослідження. Метою роботи є визначення за допомогою коміркової моделі насадкового адсорбера оптимальних умов проходження процесу отримання призначеної для напоїв пом'якшеної води. Така мета обумовлюється поліпшенням смакових якостей продуктів у разі зменшення в них кількості іонів магнію, міді, заліза тощо. Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі:

1) вивчити процес обміну іонів з однаковим зарядом, що проходить між адсорбентом і адсорбатом в точно еквівалентних співвідношеннях;

2) побудувати математичну модель адсорбційного процесу з допомогою пакета MathCAD та рівняння Ленгмюра;

3) визначити та розрахувати параметри через кінетику адсорбції, час перебування потоку в насадковому адсорбері, час захисної дії шару адсорбенту.

Виклад основного матеріалу

Кінетика адсорбції. Через адсорбент пропускають суміш, що поглинається. З плином часу адсорбент насичується адсорбтивом, і активність адсорбенту знижується. Для його регенерації через шар адсорбенту пропускають речовину, яка витіснює речовину, котра поглинулася, або нагрівають адсорбент [10-13].

При розрахунках адсорберів періодичної дії визначають час адсорбції. Використовують різні формули для визначення часу адсорбції τ залежно від того, в яку область потрапляє C_0 .

Для безперервно діючих адсорберів визначають швидкість руху адсорбенту з формули (12) [14]

$$u = \frac{1}{K}, \quad (1)$$

де K – коефіцієнт захисної дії адсорбенту (адсорбції).

Для усіх випадків визначають висоту шару адсорбенту через кількість одиниць переносу [11]

$$H = \frac{V_G}{S\beta_y} \int_{C_1}^{C_0} \frac{dC}{C - C^*}, \quad (2)$$

де C_0 , C_1 – концентрації речовини, що розподіляється, на вході в адсорбер і на виході з нього.

Інтеграл, який визначається графічно, дорівнює n – кількості одиниць переносу.

Таким чином, стандартне зменшення мольної вільної енергії адсорбції із розчину – стала величина, яка характеризує різницю енергії взаємодії молекул розчиненої речовини і розчинника з адсорбентом і енергії взаємодії розчиненої речовини з оточуючим розчинником. Ця величина не залежить від концентрації молекул компонента в кожній із рівноважних фаз і від взаємодії молекул компонента розчину між собою. По-суті, це рівняння (1) є рівнянням парціальної ізотерми адсорбції органічного компонента із водного розчину або парціальної ізотерми адсорбції речовини із розчину. Воно характеризує розподіл речовини між адсорбентом і водним

розчином. Константа адсорбційної рівноваги може бути розрахована з експериментальних даних або вирахована на основі суми інкрементів стандартного зменшення вільної енергії адсорбції для структурних елементів органічних молекул внаслідок аддитивності взаємодії при фізичній адсорбції [10].

Зроблено висновок [12, 13], що між константою адсорбційної рівноваги й енергетичною характеристикою адсорбції – зменшенням вільної енергії при адсорбції в стандартних умовах існує залежність, яка випливає з другого закону термодинаміки. Константа адсорбційної взаємодії, а відповідно, і зміна вільної енергії є важливими характеристиками адсорбованості органічної речовини [11, 13]. При $C_0/C_s \leq 0,05$ та при її збільшенні в 10 разів або зростанні на 4 кДж/моль збільшується ступінь використання адсорбційної ємності адсорбенту майже в два рази.

Досить важливим є вплив величини константи адсорбційної рівноваги на використання адсорбційної ємності активного вугілля при розчинності 100 ммоль/л. Роль розчинності у використанні адсорбційної ємності активного вугілля при заданій залишковій концентрації речовини в рівноважному розчині $C=5$ ммоль/л і однакових значеннях K суттєво впливає на адсорбційну рівновагу, в особливості при адсорбції тих речовин, які у воді значно розчиняються [2, 4, 10].

Якщо радіус пор наближається до молекулярних розмірів, то починає посилюватись дисперсійна взаємодія атомів адсорбованих молекул з атомами адсорбенту, що оточує молекулу, яка знаходиться в порі. Тому ефект збільшення енергії взаємодії молекули з атомами, які обмежують порожнину адсорбенту, проявляється тим сильніше, чим менший радіус пори і, відповідно, найбільшою мірою виражений у вузьких мікропорах.

Вже у супермікропорах цей ефект настільки слабшає, що стандартне зменшення мольної вільної енергії адсорбції з розчину виявляється практично таким же, як і при адсорбції на непористій вуглеводній поверхні або на поверхні мезо- і макропор. Відповідно, відносно широкі пори, адсорбційний потенціал яких такий же, як і потенціал непористої поверхні, заповнюються при більш високих концентраціях розчину, ніж вузькі пори з ви-

соким адсорбційним потенціалом, які заповнюються вже при дуже невеликих концентраціях розчину [3, 5, 15].

Оскільки на адсорбцію впливають одночасно кілька факторів: середня швидкість поширення, кінетика адсорбції, коефіцієнт афінності, то важливим є встановлення рівноваги між складом частини розчину, що міститься в адсорбційному об'ємі пор адсорбенту і знаходиться в полі дії адсорбційних сил, і складом зовнішнього розчину [4-6].

Водночас внаслідок вибіркової адсорбції відношення кількості органічних компонентів до кількості води в адсорбційному просторі може в багато разів перевищувати це співвідношення у зовнішньому рівноважному розчині [5].

В результаті адсорбції змінюється не тільки склад розчинів, а, відповідно, їх хімічні потенціали, що виражається залежністю [4, 7, 9, 11]

$$a_o^* = f(C_y, T).$$

При $T = \text{const}$ ізотерма $a_o^* = f(C_y)$.

Для описання процесу адсорбції використовували хімічну теорію адсорбції Ленгмюра і потенційну теорію (Дубиніна).

На практиці ізотерму адсорбції речовини розраховували, користуючись ізотермою адсорбції стандартної речовини (пари бензолу) [12, 13]:

$$a_2^* = a_1^* \frac{V_1}{V_2}, \quad (3)$$

де a_1^* – ордината ізотерми адсорбції стандартної речовини (кмоль/кг);

a_2^* – ордината ізотерми адсорбції речовини, що досліджується (кмоль/кг);

V_1 і V_2 – мольні об'єми стандартної речовини і речовини, що досліджується;

$$V = \frac{M}{\rho}, \quad (4)$$

де M – мольна маса, кг/кмоль.

Відношення мольних об'ємів парів речовин визначили як коефіцієнт афінності [12]:

$$\beta = \frac{V_2}{V_1}. \quad (5)$$

Адсорбція йде з виділенням теплоти

$$q = \frac{44 \cdot 10^3 \lg \frac{p_2}{p_1}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}, \quad (6)$$

де p_1 і p_2 – рівноважні тиски адсорбтиву над адсорбентом при T_1 і T_2 .

Якщо тепло не відводиться, то відбувається підвищення температури в адсорбері, а це негативно впливає на процеси адсорбції. Теплота адсорбції складається з теплоти конденсації і теплоти змочування. Для активованого вугілля залежність q (кДж/кг вугілля) від кількості пари, що поглинається, виражається рівнянням [11]

$$q = m a^n, \quad (7)$$

де a – кількість адсорбованої пари (дм³/г вугілля); n і m – константи (табличні).

Для органічних речовин, на відміну від неорганічних, q мало залежить від температури.

Залежність кількості тепла, що поглинається, від температури виражається формулою Трутона [13]:

$$\frac{q}{\sqrt{T_{\text{кип}}}} = \text{const}, \quad (8)$$

$$\frac{da}{d\tau} = \beta_y (C - C^*). \quad (9)$$

Для орієнтовних розрахунків β_y при адсорбції на активованому вугіллі, коли діє закон Ленгмюра, використовують рівняння [15]:

$$Nu'_z = 1,6 \text{ Re}^{0,5},$$

$$Nu'_z = \frac{\beta_y d}{D}, \quad (10)$$

де d – розмір частинок адсорбенту;

D – коефіцієнт дифузії адсорбтиву в газі, м²/с.

При дослідженні кінетики адсорбції визначали час, який називається часом захисної дії шару адсорбенту [15]:

$$K = (H - h),$$

$$Kh = KH - h_0, \quad (11)$$

де K – коефіцієнт захисної дії адсорбенту, (с/м);

H – висота шару адсорбенту;

h – висота невикористаної частини шару адсорбенту в умовах досліджу;

h_0 – кінетичний коефіцієнт, або втрата часу захисної дії сорбенту.

$$K = \frac{a_0^*}{\omega C_0}. \quad (12)$$

Диференціальне рівняння адсорбційного процесу. Розв'язання рівняння при початкових і граничних умовах дасть змогу визначити розподіл температур і концентрацій по товщині адсорбера залежно від його розмірів, режимів руху вихідної суміші, температури суміші, концентрації домішки у вихідній та кінцевій суміші. Процес адсорбції проходить за рахунок дифузії рідини в матеріал адсорбенту [9].

Враховуючи, що $\frac{\delta}{L} = 8 \div 10$, відношення опору переносу маси в напрямку осі z є на порядок більшим, ніж у напрямку осі r (радіуса) [1, 3]. Умови переносу речовини на внутрішній і зовнішній поверхні адсорбенту однакові, крім того, властивості матеріалу адсорбенту постійні по товщині δ і ширині L .

Отже, можна прийняти припущення [5]:

$$\frac{\partial C}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial z} = 0. \quad (13)$$

Тоді рівняння дифузії для адсорбенту має вигляд [1, 6]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right), \quad (14)$$

де D – коефіцієнт дифузії речовини в адсорбенті.

Початкові умови [7]:

$$\tau = 0; C = C_m.$$

Граничні умови [7]:

$$r = r_{\text{пп}}, \quad \beta_1 (C^* - C) = D \frac{\partial C}{\partial r}, \quad (15)$$

$$r = r_{\text{зовн}}, \quad 2(C^* - C) = D \frac{\partial C}{\partial r}, \quad (16)$$

де β_1 і β_2 – коефіцієнти масовіддачі на внутрішній і зовнішній поверхні відповідно;

C^* – рівноважна концентрація.

Особливістю цього рівняння є те, що розміри адсорбенту змінюються в процесі адсорбції.

Введемо коефіцієнт співвідношення розмірів адсорбенту [7, 10]:

$$K = \frac{r_{\text{зовн}}(\tau)}{r_{\text{пп}}(\tau)}. \quad (17)$$

Введемо нову змінну [1, 7]:

$$\eta = \frac{r}{r_{\text{пп}}}, \quad (18)$$

де значення змінної лежить в межах

$$1 \leq \eta \leq K.$$

Перейдемо до нової змінної [8, 9, 10]:

$$\frac{\partial C}{\partial r} = \frac{\partial C}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial r} = \frac{1}{r_{\text{пп}}}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial \eta^2} = \frac{1}{r_{\text{пп}}^2} \frac{\partial^2 C}{\partial \eta^2}. \quad (20)$$

Тоді диференціальне рівняння набуває вигляду [8, 10]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{1}{r_{\text{пп}}^2} \frac{\partial^2 C}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{1}{r_{\text{пп}}^2} \frac{\partial C}{\partial \eta} \right). \quad (21)$$

Початкові умови [6, 7]: $\tau = 0, C = C_{\text{п}},$

$$\eta = 1, \beta_1(C^* - C) = \frac{D}{r_{\text{пп}}} \frac{\partial C}{\partial \eta}, \quad (22)$$

$$\eta = K, \beta_2(C^* - C) = \frac{D}{r_{\text{пп}}} \frac{\partial C}{\partial \eta}. \quad (23)$$

Аналіз літературних джерел [3, 12, 15] показав, що для визначення наближених коефіцієнтів дифузії найбільш доцільним є використання дослідно-експериментальної методики, розглянутої в роботах, та моделювання [2, 8-14].

Результати досліджень. Розглядаємо насадковий колонний апарат-адсорбер, який задаємо до проведення експерименту комірковою моделлю.

На вхід колони (наприклад в потік рідини) вводили у вигляді імпульсу індикатор розчину. Результати аналізу наведено в таблиці 1. Далі визначали кількість комірок n порівнянням експериментально одержаної кривої відгуку з кривими, розрахованими згідно з рівнянням коміркової моделі при різноманітних значеннях кількості комірок:

$$(t) = \frac{1}{\tau} \frac{n^n}{(n-1)!} \frac{t^{n-1}}{\tau} \cdot e^{-n \cdot t/\tau}, \quad (24)$$

де τ – середній час перебування потоку в адсорбері, який може бути знайдений як математичне очікування безперервної випадкової величини t :

$$t = M[t] = \int t \cdot C_{\text{кр}}(t) dt. \quad (25)$$

Вихідні дані: 1-й стовпчик – значення часу, 2-й – концентрація індикатора на виході.

Таблиця 1 – Результати аналізу залежності вихідного потоку від вмісту індикатора

Cv :=	0	.17	Ckpt =		0
	1	1.15		0	0
	2	2.0		1	0.105
	3	2.0		2	0.252
	4	1.5		3	0.255
	5	1.14		4	0.181
	6	0.66		5	0.106
	7	.35		6	0.055
	8	.04		7	0.026
	9	.02		8	0.012
				9	5.008·10 ⁻³

Розрахункові (теоретичні) криві коміркової моделі зазвичай наводяться у безрозмірних координатах, оскільки у математичних викладках припускається, що одиничне імпульсне збурення й концентрація не мають конкретної фізичної розмірності (рисунок 1). Під безрозмірними величинами розуміються t час і диференціальна крива $Z(\theta)$.

Таким чином, для порівняння експериментальної кривої з теоретичними кривими (рисунок 1) необхідно вирахувати θ згідно із залежністю (15) і зробити відповідні перерахунки.

Шляхом порівняння знайшли необхідну кількість комірок n , яку визначили як основний параметр моделі.

Також провели нормування експериментальних значень концентрації $x(i)$ до загальної енергії імпульсу індикатора KCl , введенного у колонку. Чисельні значення визначених інтегралів, що входять у рівняння, знайшли за методом трапеції, який у загальному випадку має наступний вигляд:

$$f(x)dx = \frac{h}{2} \cdot [y_0 + y_n + 2(y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1})], \quad (26)$$

де $[a, b]$ – інтервал інтегрування;

h – крок інтегрування;

y_i – значення підінтегральної функції в i -тій точці.

Для виконання необхідних розрахунків використали пакет прикладних програм MathCAD [12, 14, 15].

Після цього нанесли на один графік C -криві відгуку, розраховані згідно з комірковою гідродинамічною моделлю, а також експериментальну C -криву у безрозмірній формі, водночас теоретичні криві мають різну кількість комірок (відповідно 1, 2, 6, 8).

Шляхом порівняння знайти необхідну кількість комірок n , яка буде визначена як основний параметр моделі.

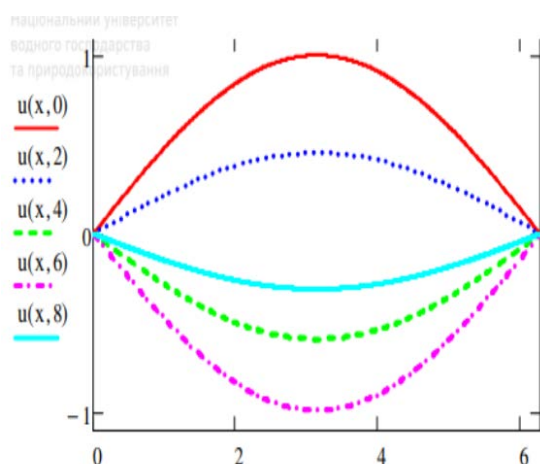


Рисунок 1 – Порівняння експериментальної кривої з теоретичними кривими при різній кількості комірок (відповідно 2, 4, 6, 8)

Далі проводимо нормування експериментальних даних з використанням методу трапеції щодо визначення інтегралу [11]:

$$c := \frac{Cv^{<1>}}{2 \sum Cv^{<1>} - Cv_{0,1} - Cv_{9,1}}$$

Визначимо середній час перебування потоку в адсорбері:

$$\tau := \frac{2 \cdot Cv^{<0>} \cdot C - Cv_{0,0} \cdot C_0 - Cv_{9,0} \cdot C_9}{2}$$

Визначимо безрозмірні величини:

$$\theta := \frac{Cv^{<0>}}{\tau},$$

$$Z := C.$$

Далі розрахували і зафіксували теоретичну C -криву для різних значень кількості комірок (2, 4, 6, 8), оцінюючи результат за величиною середньоквадратичного відхилення.

Графік у безрозмірних координатах має вигляд, як зображено на рисунку 2.

$$n := 4 \quad P(t) := \frac{1}{\tau}$$

$$C_{kp}(t) := \frac{n^n \cdot \left(\frac{1}{\tau}\right)^{n-1} e^{-n\frac{t}{\tau}}}{\tau(n-1)!}.$$

Перевіримо адекватність моделі.

$$\sigma := \sqrt{\frac{\sum (C_{kpt} - C)^2}{9}},$$

$$res := (0,035 \ 0,021 \ 0,047 \ 0,066).$$

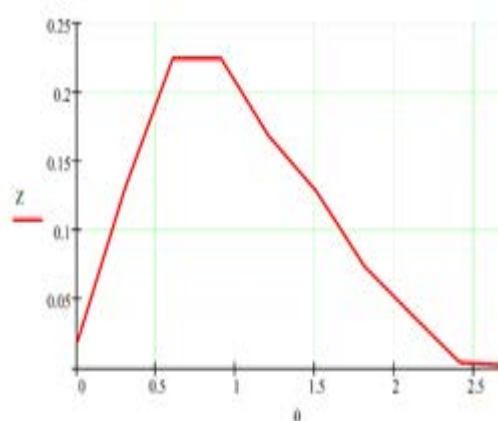


Рисунок 2 – Графік експериментально отриманої C -кривої

Результати оцінювання (таблиця 2):

1-й рядок – значення кількості комірок, 2-й рядок – середньоквадратичне відхилення).

Таким чином, параметр моделі $n=4$. Таким чином, отримана модель адсорбера є адекватною, виходячи з отриманих експериментальних значень параметру коміркової моделі: $\tau = 3.321$ $\sigma = 0,02$.

Таблиця 2 – Результати оцінювання

$C_{kpt} :=$	$C_{kp}(Cv_{0,0})$	$C =$	0	0.019
	$C_{kp}(Cv_{1,0})$			
	$C_{kp}(Cv_{2,0})$			
	$C_{kp}(Cv_{3,0})$			
	$C_{kp}(Cv_{4,0})$			
	$C_{kp}(Cv_{5,0})$			
	$C_{kp}(Cv_{6,0})$			
	$C_{kp}(Cv_{7,0})$			
	$C_{kp}(Cv_{8,0})$			
	$C_{kp}(Cv_{9,0})$			

Обговорення результатів. Комірковий метод полягає у визначенні параметра n через статистичні оцінки диференціальної функції розподілу часу перебування речовини в адсорбері. Цю функцію знаходили експериментально за даними дослідів із використанням індикатора. Водночас час перебування частинок речовини в адсорбері розглядали як випадкову величину, дискретний розподіл та ідеальність якої описали за допомогою теоретично ймовірних характеристик. Індикатор вибирають із тим розрахунком, щоб він не руйнував гідродинаміку потоку в адсорбері і в той же час легко аналізувався [10, 11-15].

Як індикатор використано розчин інертних твердих частинок. Обраний індикатор вводили у початковий потік у вигляді стандартного сигналу для спрощення подальшої аналітичної обробки експериментальних даних. У певні моменти часу після вводу індикатора відбирали проби з вихідного потоку та аналізували вміст індикатора в них. Згідно з експериментальними даними побудовано S -криву відгуку. Час перебування частинок речовини в апараті розглядали як випадкову величину, що має диференціальну функцію. Розрахункові (теоретичні) криві коміркової моделі наводяться у безрозмірних координатах і показують незначні відмінності від експериментально отриманої кривої математичної моделі, оскільки у математичних викладах припускається, що одиничне імпульсне збурення й концентрація не мають конкретної фізичної розмірності.

Висновки. Наукова новизна роботи полягає в такому:

1. Наведено та досліджено чисельно із застосуванням методу трапецій та програмного забезпечення MathCAD [4, 13] математичну модель адсорбційного процесу.

2. Вивчено процес обміну іонів з однаковим зарядом, що проходить між адсорбентом і адсорбатом в точно еквівалентних співвідношеннях; побудовано математичну модель адсорбційного процесу з допомогою пакета MathCAD та рівняння Ленгмюра; визначено та розраховано параметри через кінетику адсорбції, час перебування потоку в насадковому адсорбері, час захисної дії шару адсорбенту.

3. Розглянуто основні теоретичні аспекти розрахунку кінетики адсорбції, часу перебування потоку в насадковому адсорбері, часу захисної дії шару адсорбенту та диференціальне рівняння адсорбційного процесу згідно з початковими та граничними умовами. Графічно отримано S -криву у безрозмірних координатах, що демонструє математичну модель адсорбційного процесу.

4. Обчислено оптимальну кількість комірок порівнянням експериментально одержаної кривої відгуку з кривими, розрахованими згідно з рівнянням коміркової моделі при різноманітних значеннях.

5. Вивчено процес обміну іонів з однаковим зарядом, який проходить між адсорбентом і адсорбатом у точно еквівалентних співвідношеннях, для того щоб пом'якшити воду, яка призначена для виготовлення безалкогольних і алкогольних напоїв, виноматеріалів, оскільки смакові якості цих продуктів поліпшуються в разі зменшення в них іонів магнію, міді, заліза.

Проблеми математичного моделювання адсорбційних процесів у неоднорідних середовищах та методи побудови математичних задач таких моделей потребують подальшого вивчення та мають перспективу подальших досліджень.

Список використаних джерел

- [1] T. G. Myers, and M. G. Hennessy, "Mathematical modelling of carbon capture in a packed column by adsorption", *Applied Energy*, vol. 278, Nov. 15, 2020. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115565.
- [2] E. Igberase, and P. O. Osifo, "Mathematical modelling and simulation of packed bed column for the efficient adsorption of Cu (II) ions using modified bio-polymeric material", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, no. 7 (3), 2019.
- [3] Amirhossein Ghorbani1, Ramin Karimzadeh, and Masoud Mofarahi, "Mathematical modeling of fixed bed adsorption: breakthrough curve", Department of chemical engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 2018. doi: 10.22059/JCHPE.2018.255078.1226.

- [4] M. Askari, and H. Adibi, "Numerical solution of advection-diffusion equation using meshless method of lines", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, vol. 41, no. 2, pp. 457-464, 2017.
- [5] М. П. Ленюк, "Математичне моделювання адсорбційного масопереносу зі спектральним параметром для неоднорідних пінтерфейсних циліндричних обмежених мікропористих середовищ з порожниною", *Вісник Тернопільського державного технічного університету*, т. 9, № 4, с. 147-148, 2014.
- [6] М. Р. Петрик, "Математичне моделювання нелінійних динамічних задач адсорбції та дифузії для нерухомого шару адсорбенту", *Інтегральні перетворення та їх застосування до крайових задач: зб. наук. пр., вип. 5*, с. 201-215. Київ: Ін-т математики НАНУ, 2000.
- [7] И. А. Буртная, и Д. В. Литвиненко, "Математическая модель процесса перапоарации для бинарных смесей", *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, т. 2, № 4 (50), с. 8-11, 2011. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/1766/1662>.
- [8] И. В. Сергиенко, В. В. Скопецкий, и В. С. Дейнека, *Математическое моделирование и исследование процессов в неоднородных средах*. Киев, Украина: Наукова думка, 2001.
- [9] P. N'Gokoli-Kekele, M. A. Spiringuel-Huet, and J. Fraissard, "An analytical study of molecular transport in zeolite bed", *Adsorption (Kluwer)*, no. 8, p. 35-44, 2002.
- [10] В. В. Кузьмин и др., *Математическое моделирование технологических процессов сборки и механической обработки изделий машиностроения: учебник для вузов*. Москва, Россия: Высшая школа, 2008.
- [11] Б. Я. Советов, и С. А. Яковлев, *Моделирование систем: учебник для вузов*, 3-е изд., перераб и доп. Москва, Россия: Высшая школа, 2001.
- [12] А. Н. Остриков и др., *Процессы и аппараты пищевых производств*, кн. 1. Санкт-Петербург, Россия: ГИОРД, 2007.
- [13] А. М. Поперечный, О. І. Черевко, В. Б. Гаркуша, та Н. В. Кирпиченко, *Процеси та апарати харчових виробництв: підручник*, А. М. Поперечний, Ред. Київ, Україна: Центр учбової літератури, 2007.
- [14] В. П. Дьяконов и др., *Новые информационные технологии: учеб. пособие*, В. П. Дьяконов, Ред. Москва, Россия: СОЛОН-Пресс, 2005.
- [15] В. Г. Дулов, и В. А. Цибаров, *Математическое моделирование в современном естествознании: учеб. пособие*, В. Г. Дулов, Ред. Санкт-Петербург, Россия: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001.

References

- [1] T. G. Myers, and M. G. Hennessy, "Mathematical modelling of carbon capture in a packed column by adsorption", *Applied Energy*, vol. 278, Nov. 15, 2020. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115565.
- [2] E. Igberase, and P. O. Osifo, "Mathematical modelling and simulation of packed bed column for the efficient adsorption of Cu (II) ions using modified bio-polymeric material", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, no. 7 (3), 2019.
- [3] Amirhossein Ghorbani¹, Ramin Karimzadeh, and Masoud Mofarahi, "Mathematical modeling of fixed bed adsorption: breakthrough curve", Department of chemical engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 2018. doi: 10.22059/JCHPE.2018.255078.1226.
- [4] M. Askari, and H. Adibi, "Numerical solution of advection-diffusion equation using meshless method of lines", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, vol. 41, no. 2, pp. 457-464, 2017.
- [5] М. Р. Ленюк, "Mathematical modeling of adsorption mass transfer with spectral parameter for inhomogeneous n-interface cylindrical bounded microporous media with a cavity", *Visnyk Ternopilskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu*, vol. 9, no. 4, pp. 147-148, 2014 [in Ukrainian].
- [6] М. Р. Петрик, "Mathematical modeling of nonlinear dynamic problems of adsorption

- and diffusion for a fixed layer of adsorbent", *Integral transformations and their application to boundary value problems*: coll. of sci. papers, iss. 5, pp. 201-215. Kyiv: In-t matematyky NANU, 2000 [in Ukrainian].
- [7] I. A. Burtaya, and D. V. Litvinenko, "Mathematical model of the pervaporation process for binary mixtures", *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, vol. 2, no. 4 (50), pp. 8-11, 2011. [Online]. Available: <http://journals.urau.ru/eejet/article/view/1766/1662> [in Russian].
- [8] I. V. Sergienko, V. V. Skopetsky, and V. S. Deineka, *Mathematical modeling and study of processes in inhomogeneous media*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2001 [in Russian].
- [9] P. N'Gokoli-Kekele, M. A. Spiringuel-Huet, and J. Fraissard, "An analytical study of molecular transport in zeolite bed", *Adsorption* (Kluwer), no. 8, p. 35-44, 2002.
- [10] V. V. Kuzmin et al., *Mathematical modeling of technological processes of assembly and mechanical processing of mechanical engineering products*: textbook for universities. Moscow, Russia: Vysshaya shkola, 2008 [in Russian].
- [11] B. Ya. Sovetov, and S. A. Yakovlev, *Modeling of systems*: textbook for universities, 3rd ed., revised and suppl. Moscow, Russia: Vysshaya shkola, 2001 [in Russian].
- [12] A. N. Ostrikov et al., *Processes and devices of food production*, book 1. St. Petersburg, Russia: Giord, 2007 [in Russian].
- [13] A. M. Poperechny, O. I. Cherevko, V. B. Garkusha, and N. V. Kirpychenko, *Processes and apparatus of food production*: textbook, A. M. Poperechny, Ed. Kyiv, Ukraine: Tsentr uchbovoi literatury, 2007 [in Ukrainian].
- [14] V. P. Dyakonov et al., *New information technologies*: textbook, V. P. Dyakonov, Ed. Moscow, Russia: SOLON-Press, 2005 [in Russian].
- [15] V. G. Dulov, and V. A. Tsibarov, *Mathematical modeling in modern natural science*: textbook, V. G. Dulov, Ed. St. Petersburg, Russia: Izd-vo St. Petersburg. un-ta, 2001 [in Russian].

O. O. Onyschuk, Ph. D., Associate Professor

e-mail: oksanaduda2013@gmail.com

Lesya Ukrainka Volyn National University

Potapova, 9, Lutsk, 43000, Ukraine

OPTIMIZED CALCULATION OF ADSORPTION PROCESS THROUGH THE NOZZLE ADSORBER BY THE CELL MODEL METHOD

This paper considers the main theoretical calculations of adsorption kinetics, time of the flow in the nozzle adsorber, time of protective action of the adsorbent layer, average speed of adsorption process and the differential equation of the adsorption process according to initial and boundary conditions. Graphically, C-curve has been obtained, which is presented in dimensionless coordinates and demonstrates a mathematical model of adsorption process. The optimal number of cells is calculated by comparing the experimentally obtained response curve with the curves calculated according to the equation of the cell model at different values. In addition, the amount of heat according to the Langmuir's law for adsorption on activated carbon and the dependence of the amount of heat adsorbed on temperature using the Truton's equation have been determined. A mathematical model of the adsorption process, which has been studied using the cell model method and software, is presented. Using the MathCAD application package and the Langmuir's equation, this model has been solved by comparing the required number of cells n , which is defined as its main parameter. Based on the experimental curve, an assumption is made about the possible form of the cell model of adsorption process and mathematical processing of this curve is performed. The obtained values of model parameters have been calculated, the experimental data have been normalized by the trapezoidal method and the model has been tested for adequacy. The process of exchange of ions with the same charge, which

takes place between the adsorbent and the adsorbate in exactly equivalent proportions in order to soften the water intended for the production of soft and alcoholic beverages, wine materials, is studied, as the taste of these products improves with the reduction of magnesium, copper and iron ions. Problems of mathematical modeling of adsorption processes in inhomogeneous media and methods of constructing mathematical problems of such models require further study and have the prospect of further research.

Keywords: adsorption, mathematical model, thermal processes, cell model, trapezoid method, MathCAD.

УДК 502.175:656.13.05

[0000-0001-8975-851X] **Л. Б. Ящук**, канд. хім. наук, доцент
e-mail: l_yashchuk@ukr.net

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

МОЖЛИВОСТІ РОЗРАХУНКОВИХ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ЕКОЛОГІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ В ОРГАНІЗАЦІЇ МІСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

Одним із основних джерел забруднення атмосферного повітря міст у наш час є автомобільний транспорт. Наслідком збільшення кількості автотранспорту є зростання рівня забруднення забудованих територій. Актуальним та перспективним напрямом досліджень є застосування комплексу методів моніторингу для визначення внеску транспортної мережі міських агломерацій у забруднення атмосферного басейну та розробка заходів щодо оптимізації дорожнього руху.

Оцінка екологічної доцільності під час організації дорожнього руху в місті визначалася розрахунком обсягів викидів автотранспорту на регульованих перехрестях залежно від інтенсивності трафіку. З використанням розрахункових методів моніторингу проаналізовано інтенсивність викидів автотранспорту на досліджуваних ділянках м. Черкаси. Кореляції між інтенсивністю транспортних потоків та обсягами викидів на регульованих перехрестях не відмічено. В зоні дослідних ділянок виявлено перевищення допустимого рівня забруднення атмосферного повітря за всіма речовинами. Найбільші перевищення ГДК забруднюючих речовин спостерігалися на вулицях з інтенсивним рухом автомобільного транспорту і тривалим часом заборонного сигналу світлофора. Так, наприклад, перехрестя вул. Чорновола – проспект Хіміків характеризується середньою інтенсивністю транспортного потоку, але має найбільші значення викидів забруднюючих речовин через значну тривалість заборонного сигналу світлофора. Пропонується зменшити час сигналу на 30 %, що зменшить концентрацію шкідливих речовин, таких як CO, NO₂, вуглеводні та SO₂ у кілька разів.

Ключові слова: *атмосферне повітря, моніторинг, автотранспорт, розрахункові методи, екологічні нормативи.*

Вступ. Сучасна забудова міст в Україні часто відбувається вздовж побудованих ще в середині ХХ ст. транспортних міських шляхів. Значне збільшення кількості автомобілів у країні та наявність застарілих транспортних систем, побудованих без урахування принципів сталого розвитку, суттєво впливають на погіршення атмосферного повітря урбоценозів [1, 2]. Забруднення атмосферного повітря автотранспортом визначається не лише потужністю джерела забруднення чи його інтенсивністю. Просторові характеристики транспортних артерій та особливості атмосферних процесів і мікроклімату міського середовища значною мірою можуть визначати характер та інтенсивність забруднення повітряного басейну [3, 4, 5].

Основними підходами для встановлення кількісної величини впливу забруднюючої речовини є аналіз даних системи моніторингу за станом атмосферного повітря населених

пунктів та використання математичних моделей прогнозування забруднення [6]. Регресійні моделі (Land-use regression models, LUR) розглядають концентрацію забруднюючої речовини як змінну величину, яка залежить від параметрів транспортного потоку, щільності автодоріг у точці дослідження, метеорологічних та інших показників, які є визначальними для прогнозування концентрації у заданій точці. Таким чином, регресійні моделі дозволяють врахувати визначальні фактори для формування та просторового поширення забруднення, обумовленого автомобільним транспортом, і найкраще підходять для оцінки якості атмосферного повітря у межах селищних зон міст, особливо за умов відсутності чи неповноти даних спостереження за станом атмосферного повітря [7].

У час високої розвиненості транспортної інфраструктури важливим є розроблення оптимізаційних заходів, спрямованих на зни-

ження загазованості повітря шкідливими викидами автотранспорту, оскільки транспорт є основним джерелом забруднення повітря у великих містах.

Метою роботи є комплексна оцінка ступеня хімічного забруднення атмосферного повітря м. Черкаси викидами автомобільного транспорту. Для цього були поставлені задачі:

- дослідження особливостей формування хімічного забруднення атмосферного повітря викидами автомобільного транспорту на найбільш завантажених регульованих перехрестях транспортних магістралей м. Черкаси на підставі натурних досліджень;
- оцінки забруднення приземного шару атмосферного повітря відпрацьованими газами автомобільних транспортних засобів на дослідних ділянках за допомогою математичних моделей.

Виклад основного матеріалу. Вплив автомобільного транспорту на екологічну ситуацію у нашій країні досяг критичної межі. Серед значної кількості джерел забруднення навколишнього природного середовища суттєву небезпеку становлять автотранспортні системи (автомобільні дороги та транспортні засоби). Проблемою великих міст є екологічна безпека, пов'язана зі станом повітря в місцях найбільш інтенсивних транспортних потоків, якими, перш за все, є перехрестя.

Дослідження фахівців показують, що найбільш інтенсивне зменшення концентрації забруднювальних речовин відбувається у зоні 12-20 м від дороги [1].

Аналіз попереднього досвіду екологічних досліджень у дорожньо-транспортній сфері показує, що у більшості вони проводяться окремо для транспортних потоків та автомобільних доріг.

Моніторинг за станом атмосферного повітря в м. Черкаси свідчить про особливості метеорологічного режиму в обласному центрі, які зумовлені забудовою міських мікрорайонів, розміщенням на березі водосховища та територіальним розташуванням промислового комплексу. Восени та навесні в межах міської екосистеми часто утворюються тумани. Літо з тривалими періодами засухи у поєднанні з безвітряною погодою призводять до низької здатності повітря до природного самоочищення в межах урбоекосистеми та до сталого його забруднення [8, 9]. В м. Черкаси є кілька великих транспортних артерій: бульвар Шевченка, вулиці Благовісна, Чорновола та Смілянська. Дослідження особливостей транспортного навантаження в межах міста показало, що у структурі руху переважає транспорт легковий – 72 %, автобуси – 27 %, на частку вантажівок припадає близько 1 % [10]. Серед основних проблем у розподілі транспортних потоків у м. Черкаси є: відсутність єдиної системи управління громадським транспортом та чітких графіків руху, відсутність сполучення різних районів у межах одного маршруту, дублювання автобусних маршрутів із тролейбусними.

Матеріали та методи досліджень. Вивчення особливостей формування хімічного забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту на найбільш завантажених регульованих перехрестях транспортних магістралей м. Черкаси проводили розрахунковим методом, а усереднення отриманих даних зроблено на основі типології перехрестя.

Для дослідження було обрано сім перехресть (дослідних ділянок) з різною інтенсивністю руху транспорту (таблиця 1).

Таблиця 1 – Розподіл дослідних ділянок залежно від інтенсивності трафіку транспорту

Інтенсивність руху автотранспорту	№ дослідної ділянки	Перехрестя вулиць
Висока інтенсивність	1	Грушевського – Благовісна
	2	Смілянська – Надпільна
	3	Чорновола – Благовісна
Середня інтенсивність	4	Можайського – бульвар Шевченка
	5	Чорновола – проспект Хіміків
Низька інтенсивність	6	Чехова – Надпільна
	7	Сумгайтська – Ярославська

Для визначення рівня хімічного забруднення атмосферного повітря на дослідних ділянках використовували методику розрахунку

викидів автотранспорту в районі регульованого перехрестя [11]. Інтенсивність забруднення і-тою забруднюючою речовиною M_{Pi} в зоні

перехрестя при заборонному сигналі світлофора визначали за основною формулою методики:

$$M_{\text{Пі}} = \frac{P}{40} \cdot \sum_{n=1}^{N_{\text{ц}}} \cdot \sum_{k=1}^{N_{\text{гр}}} (M'_{\text{пі}}, k \cdot Gk, n). \quad (1)$$

Відбір матеріалу проводили одноразово, в денний час. Інтенсивність руху автотранспорту визначали методом підрахунку різних типів автомобілів на 1 годину. На кожній точці спостереження проводилась оцінка вулиці за критеріями: тип та нахил вулиці, швидкість вітру, відносна вологість повітря, наявність захисної смуги з дерев.

Розрахунок концентрації чадного газу як основного забруднюючого компонента вихлопних газів проводили за формулою Бегма, модифікованою Шаповаловим [12].

$$K_{\text{CO}} = (0,5 + 0,01 \cdot N \cdot K_{\text{T}}) \cdot K_{\text{a}} \cdot K_{\text{y}} \cdot K_{\text{c}} \cdot K_{\text{b}} \cdot K_{\text{n}}. \quad (2)$$

Для визначення ступеня забруднення повітря розрахована на дослідних ділянках концентрація СО порівнювалась з ГДК чадного газу для атмосферного повітря [12].

Розрахунок концентрації забруднюючих речовин у зоні перехрестя проводився з використанням моделі розсіювання Гауса на основі методики ОНД-86 [13] та за допомогою «Gaussian Dispersion Model Calculator».

Інтенсивність автотранспортних потоків на обраних ділянках вулично-дорожньої мережі охарактеризовано на основі проведеного загального обліку руху автотранспорту в обох напрямках. Для визначення максимального транспортного навантаження на зазначених перехрестях спостереження проводилися протягом робочого тижня в години «пік»: з 8 до 11 та з 16 до 19 годин. Щільність транспортних потоків через досліджувані перехрестя зображено на рисунку 1.



Рисунок 1 – Добова інтенсивність руху транспортних засобів на перехрестях за день (в одиницях)

Результати досліджень. Аналіз транспортного навантаження на дослідних перехрестях (рисунок 1) показав, що найбільшу частку в структурі автотранспортних засобів під час натурних досліджень становлять лег-

кові автомобілі, друге місце посідають автобуси. Найбільше вантажного автотранспорту спостерігалось на перехрестях транспортних магістралей (таблиця 2, дослідні ділянки 1, 2, 3).

Таблиця 2 – Середня сумарна кількість транспортних засобів на дослідних ділянках за день

№ з/п ділянки	Загальна кількість автотранспорту	Легкові автомобілі	Вантажні автомобілі	Автобуси
1	4279	3449	88	430
2	5012	3810	92	735
3	4068	3286	80	413
4	2846	2298	31	301
5	3342	2634	78	386
6	1976	1700	47	87
7	2263	1766	56	198

Для дослідження компонентного складу сумарних викидів шкідливих речовин залежно від кількості та типу автомобілів на перехрестях було використано усереднені питомі ви-

киди двигунів транспортних засобів (г/хв), що враховують режим руху автомобілів в районі перетину перехрестя (гальмування, холостий хід, розгін) (таблиця 3) [14, 15].

Таблиця 3 – Питомі значення обсягів викидів для автомобілів, що знаходяться в зоні перехрестя

Найменування групи автомобілів	№ групи	Викиди, г/хв					
		CO	NO _x (в перерах. на NO ₂)	C _n H _m	Сажа	SO ₂	Бенз(а)пірен
Легкові вітчизняні	I _в	0,8	0,02	0,12	0,02	0,006	0,4 · 10 ⁻⁶
Легкові зарубіжні	I _з	0,3	0,01	0,05	0,01	0,006	0,2 · 10 ⁻⁶
Мікроавтобуси й автофургони	II	2,0	0,04	0,25	0,04	0,012	0,8 · 10 ⁻⁶
Автобуси бензинові	III	4,0	0,08	0,9	-	0,009	1,2 · 10 ⁻⁶
Автобуси дизельні	IV	1,1	0,11	0,6	0,2	0,015	1,6 · 10 ⁻⁶
Вантажні бензинові, маса яких більша 3,5 т (враховуючи ті, що працюють на зрідженому газі)	V	10,0	0,12	1,2	-	0,009	4,0 · 10 ⁻⁶
Вантажні дизельні, маса < 12 т	VI	1,5	0,12	0,6	0,23	0,02	2,0 · 10 ⁻⁶
Вантажні дизельні, маса > 12 т	VII	12,0	8,0	6,5	0,5	0,12	2,5 · 10 ⁻⁶

Найбільший вплив на концентрацію шкідливих викидів у повітрі на перехрестях, враховуючи коефіцієнт токсичності транспортних засобів, мають автобуси з бензиновим та дизельним двигуном. Це властиво для всіх груп шкідливих викидів. На обсяги викидів NO₂ суттєвий вплив мають автобуси та ван-

тажівки з дизельним двигуном) [15].

Розрахункова інтенсивність викидів забруднюючих речовин у зоні досліджуваних перехресть свідчить про відсутність прямої залежності між кількістю транспортних засобів, що перетинають перехрестя, та інтенсивністю викидів (таблиця 4).

Таблиця 4 – Розрахунковий обсяг викидів небезпечних речовин в зоні досліджуваних перехресть

№	Викид забруднюючої речовини, г/с						
	CO	NO _x (в перерах. на NO ₂)	C _n H _m	Сажа	SO ₂	CH ₂ O	Бенз(а)пірен
1	10,00	0,35	2,13	0,44	0,10	0,16	6,3 · 10 ⁻⁶
2	19,49	0,70	4,37	0,86	0,18	0,43	1,2 · 10 ⁻⁶
3	8,55	0,30	1,83	0,38	0,09	0,13	5,4 · 10 ⁻⁶
4	11,75	0,41	2,46	0,49	0,12	0,18	7,2 · 10 ⁻⁶
5	17,26	0,60	3,68	0,75	0,16	0,26	1,1 · 10 ⁻⁶
6	3,73	0,11	0,67	0,13	0,04	0,03	2,2 · 10 ⁻⁶
7	4,97	0,16	0,97	0,19	0,05	0,06	2,92 · 10 ⁻⁶

Головним чинником збільшення чи зменшення інтенсивності викидів у повітря є категорії автотранспорту та час заборонного сигналу світлофора (чим довший сигнал, тим

більший час роботи автомобіля в режимі холостого ходу).

Основну частину викидів автотранспорту на дослідних ділянках займає чадний газ

(понад 50 % від загальної кількості викидів). Порівняння інтенсивності викидів оксиду карбону з інтенсивністю руху автотранспорту

(рисунк 2) свідчить про відсутність прямої залежності між цими двома критеріями.

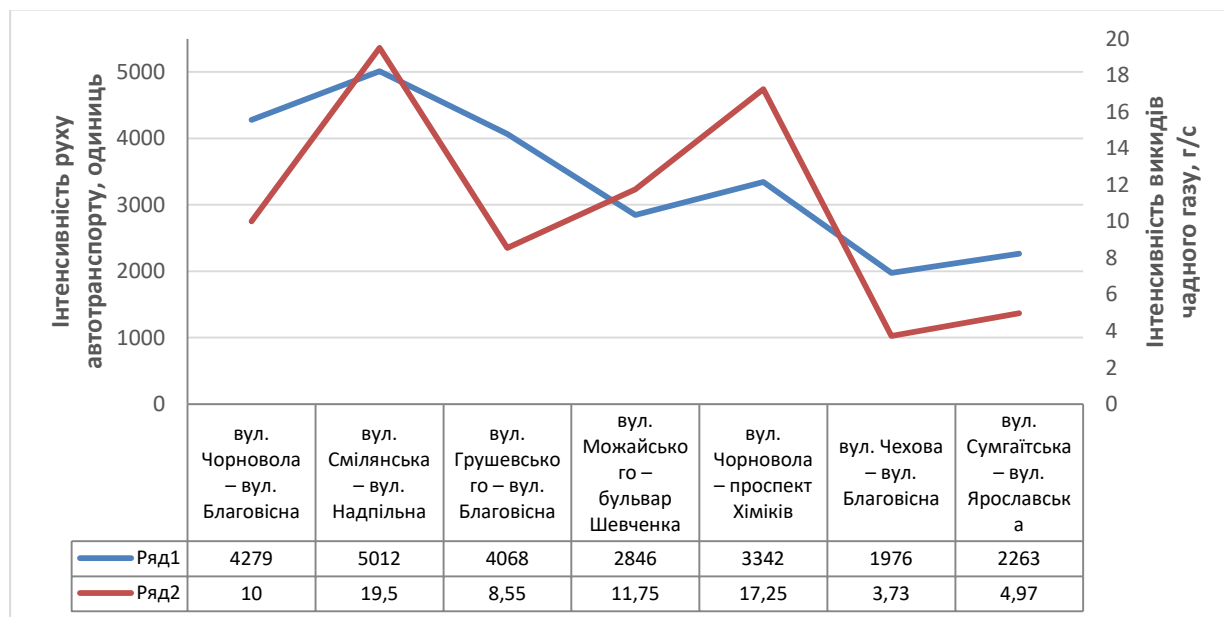


Рисунок 2 – Співвідношення інтенсивності руху автотранспорту і обсягу викидів чадного газу на дослідних ділянках

Розрахункова концентрація забруднюючих речовин у зоні досліджуваних перехресть (таблиця 5) свідчить про значне забруднення атмосферного повітря по всіх хімічних речовинах у складі викидів автотранспорту. Висока інтенсивність руху транспорту в межах міста, де розташовані щільні забудови,

низька провітрюваність вулиць зумовлює накопичення в атмосфері шкідливих речовин, в цьому випадку СО. Викиди чадного газу є стійкими та можуть зберігатися в атмосфері протягом 2-4 місяців, навіть якщо ці викиди буде припинено.

Таблиця 5 – Розрахункова концентрація забруднюючих речовин в зоні досліджуваних перехресть та значення ГДК для речовин

№	Викид забруднюючої речовини, мг/м ³						
	СО	NO _x (в перерах. на NO ₂)	C _n H _m	Сажа	SO ₂	CH ₂ O	Бенз(а)-пірен
1	19,60	0,70	4,18	0,87	0,20	0,31	1,2 · 10 ⁻⁵
2	38,20	1,37	8,56	1,69	0,35	0,84	2,35 · 10 ⁻⁶
3	16,76	0,60	3,58	0,75	0,17	0,25	1,1 · 10 ⁻⁵
4	23,03	0,79	4,81	0,97	0,23	0,34	1,4 · 10 ⁻⁶
5	33,82	1,18	7,22	1,47	0,32	0,52	2,16 · 10 ⁻⁶
6	7,31	0,22	1,32	0,25	0,07	0,05	4,31 · 10 ⁻⁶
7	9,74	0,31	1,90	0,37	0,09	0,11	5,68 · 10 ⁻⁶
ГДК	5	0,2	1	0,15	0,5	0,035	0,1 · 10 ⁻⁶

Найбільші перевищення спостерігалися на вулицях з інтенсивним рухом автомобільного транспорту і щільною забудовою, тобто там, де погані умови провітрювання території, внаслідок чого відбувається повільне розсіювання шкідливих речовин.

Порівняння викидів СО в атмосферне повітря в межах дослідних ділянок (рисунк 3) свідчить, що найбільший рівень забруднення атмосферного повітря оксидом вуглецю за годину спостерігається на модельній ділянці № 1 «вул. Чорновола – вул. Благовісна» – 45,3 мг/м³, що в 7 разів перевищує ГДК.



Рисунок 3 – Обсяги викидів СО в атмосферне повітря автотранспортом за годину в межах дослідних ділянок м. Черкаси

Проведений розрахунок концентрації чадного газу в атмосферному повітрі в межах дослідних ділянок міста вказує на підвищену загрозу для здоров'я людини при проживанні

та постійному перебуванні в районах інтенсивного завантаження транспортних перехресть (рисунок 4).



Рисунок 4– Рівень забрудненості чадним газом дослідних ділянок на карті м. Черкаси

Оксид вуглецю є однією з основних шкідливих речовин, які потрапляють в атмосферне повітря через відпрацьовані гази автомобілів. Оксид вуглецю є основною речовиною, що порушує газообмін в організмі. Вміст СО у повітрі 0,01 % з тривалістю дії понад одну годину спричиняє головний біль, погіршення реакції та зменшення працездатності. Більші концентрації та тривале вдихання призводить до серцево-судинних захворювань, розвитку атеросклерозу, враження центральної нервової системи, інфаркту міокарда, розвитку легеневих захворювань [7].

© Л. Б. Яшук, 2022
 DOI: 10.24025/2306-4412.1.2022.259092

Висновки Для оцінки ролі впливу автотранспорту на якість атмосферного повітря залежно від особливостей транспортної системи міста було обрано перехрестя з найбільшою інтенсивністю транспортних потоків, наслідком чого є висока ймовірність забруднення повітряного басейну викидами транспорту в концентраціях, що перевищують ГДК.

Розрахунок ступеня забрудненості повітря в межах міських перехресть показав значний вплив нераціональної та застарілої експлуатації транспортної мережі на рівень забруднення атмосферного повітря та необ-

хідність реформування транспортної системи м. Черкаси.

В районі регульованих перехресть спостерігається значне перевищення викидів забруднюючих речовин від автотранспорту. Значну частину від загальної кількості викидів займають чадний газ (50-65 %) і вуглеводні (10-20 %).

Розрахована інтенсивність викидів свідчить про перевищення допустимого рівня забруднення по всіх хімічних речовинах у складі викидів автотранспорту. Прямої залежності між кількістю транспортних засобів, що перетинають перехрестя, та інтенсивністю викидів не відмічено. Найбільші перевищення отримано на вулицях з інтенсивним рухом автомобільного транспорту і довгим часом заборонного сигналу світлофора. Зокрема, перехрестя вул. Чорновола – проспект Хіміків характеризується середньою інтенсивністю транспортного потоку, але має більші значення викидів забруднюючих речовин через значну тривалість заборонного сигналу світлофора. Пропонується зменшити час сигналу на 30 %, що зменшить концентрацію шкідливих речовин, таких як CO, NO₂, CH та SO₂ у кілька разів.

Система екологічної безпеки атмосферного повітря у м. Черкаси вимагає удосконалень у зв'язку з перевищеннями фактичних значень забрудненості над нормативними параметрами.

Рекомендації з покращення екологічного стану перехресть можуть бути розроблені через оптимізацію транспортних потоків із застосуванням інтелектуальних транспортних систем.

Для усунення екологічної проблеми загазованості перехресть необхідно зменшувати інтенсивність транспортних потоків через транспортні розв'язки.

Для покращення якості атмосферного повітря в м. Черкаси у зв'язку зі зростаючим тиском пересувних джерел забруднення в обласному центрі доцільно запровадити такі заходи:

– заохочення власників автопарку, що займаються міськими перевезеннями, переходити на сучасні моделі міського транспорту з використанням більш екологічно чистих видів пального;

– розробка та впровадження транспортної реформи в місті, яка б враховувала особливості транспортної мережі міста та відпові-

дала сучасним вимогам ЄС до організації міських перевезень;

– будівництво об'їзних шляхів поза містом для транзитного і вантажного транспорту;

– збільшення кількості зелених насаджень поруч із автомагістралями.

Екологічна безпека на території м. Черкаси має забезпечуватися широким комплексом взаємопов'язаних заходів. Вони повинні утворювати своєрідний правовий механізм, який слід розуміти як систему засобів, спроможну посилювати рівень екологічної безпеки, попереджувати погіршення екологічної обстановки транспортних перехресть і виникнення небезпеки для населення.

Список використаних джерел

- [1] Г. Р. Фоменко, "Транспортні потоки та їхній вплив на рівень забруднення міських магістралей", *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, т. 31 (70), ч. 2, № 3, с. 119-123, 2020.
- [2] О. Чернишов, *Вплив транспорту на екологію міста. Аналіз та стратегії для України*. Харків, Україна, 2016. Режим доступу: <https://ucn.org.ua/wp-content/uploads/2017/02/transport>.
- [3] В. І. Гук, та Ю. М. Шкодовський, *Транспортні потоки: теорія та її застосування в урбаністиці: монографія*. Харків, Україна: Золоті сторінки, 2009.
- [4] В. Ф. Бабій, В. М. Худова, та О. Є. Кондратенко, "Нагальні проблеми впливу сучасного автотранспорту на довкілля", *Гігієна населених місць: зб. наук. пр.*, вип. 58, с. 53-60, 2011.
- [5] Haneen Khreis, Mark Nieuwenhuijsen, and Tara Ramani, *Traffic-Related Air Pollution Book*, 2020. [Online]. Available: <https://www.googleadservices.com/pagead/>.
- [6] О. Г. Васенко, О. В. Рибалова, С. Р. Артем'єв та ін., *Інтегральні та комплексні оцінки стану навколишнього природного середовища: монографія*. Харків, Україна: НУГЗУ, 2015.
- [7] О. В. Ананьєва, "Вдосконалення гігієнічної оцінки забруднення атмосферного повітря викидами автомобільного транспорту": дис. канд. біол. наук, Київ, 2017.
- [8] О. О. Мислюк, та Л. М. Гримак, "Вплив транспортної мережі на екологічну безпеку міста Черкаси", на *Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених та студен-*

- тів Екологічна безпека держави: тези доп. (16-18 квіт. 2013 р.), Київ, 2013, с. 5.
- [9] Профіль міста Черкаси. Черкаси, 2020.
- [10] Л. Б. Яшук, "Оцінка внеску автотранспорту в забруднення атмосфери м. Черкаси", на Всеукр. наук.-практ. конф. курсантів і студентів Пожежна та техногенна безпека: Наука і практика (15-16 квіт. 2018 р.), Черкаси: ЧПБ, 2018, с. 160-161.
- [11] Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов. Москва, 1999.
- [12] ДСТУ 4277:2004. Норми і методи вимірювань вмісту оксиду вуглецю та вуглеводнів у відпрацьованих газах автомобілів з двигунами, що працюють на бензині або газовому паливі. Київ, 2004.
- [13] Методика розрахунку концентрацій в атмосферному повітрі шкідливих речовин, що містяться у викидах підприємств / ОНД 86, Госкомгідромета, 1997.
- [14] І. А. Кара, "Екологічна небезпека від транспортних потоків у містах (на прикладі загазованості повітряного басейну)", Молодий вчений, № 9 (61), с. 436-441, вересень 2018.
- [15] Н. Є. Паньків, та Н. З. Тетерко, "Оцінювання забруднення атмосферного повітря внаслідок завантаженості вулиць Львова автотранспортом", Науковий вісник НЛТУ України, вип. 26.8, с. 215-223, 2016.
- the impact of modern motor transport on the environment", *Hihiiena naselenykh mists: collection of sci. papers*, iss. 58, pp. 53-60, 2011 [in Ukrainian].
- [5] Haneen Khreis, Mark Nieuwenhuijsen, and Tara Ramani, *Traffic-Related Air Pollution Book*, 2020. [Online]. Available: <https://www.googleadservices.com/pagead/>.
- [6] O. H. Vasenko, O. V. Rybalova, C. R. Artemyev et al., *Integral and complex assessments of the environment: monograph*. Kharkiv, Ukraine: NUCZU, 2015 [in Ukrainian].
- [7] O. V. Ananieva, "Improvement of the hygienic assessment of air pollution by emissions from motor transport", Ph.D. thesis, Kyiv, 2017 [in Ukrainian].
- [8] O. O. Myslyuk, and L. M. Hrymak, "The impact of the transport network on the environmental safety of the city of Cherkasy", in *All-Ukr. sci.-pract. conf. of young scientists and students Ecological security of the state: abstracts*, (Apr. 16-18, 2013), Kyiv, 2013, p. 5 [in Ukrainian].
- [9] *Profile of the city of Cherkasy*. Cherkasy, 2020 [in Ukrainian].
- [10] L. B. Yashchuk, "Estimation of the contribution of motor transport to air pollution in Cherkasy", in *Proc. All-Ukr. sci.-pract. conf. of cadets and students Fire and man-made safety: Science and practice*, (Apr. 15-16, 2018), Cherkasy: ChIPB, 2018, pp. 160-161 [in Ukrainian].
- [11] *Methods for determining vehicle emissions for consolidated calculations of urban air pollution*. Moscow, 1999 [in Russian].
- [12] DSTU 4277:2004. *Standards and methods for measuring the content of carbon monoxide and hydrocarbons in the exhaust gases of cars with engines running on gasoline or gas fuel*. Kyiv, 2004. [in Ukrainian].
- [13] *Methods for calculating concentrations in the air of harmful substances contained in emissions of enterprises / CIS 86*, Goskomgidrometa, 1997 [in Ukrainian].
- [14] I. A. Kara, "Environmental danger from traffic flows in cities (on the example of air pollution)", *Molodyi vchenyi*, no. 9 (61), Sept. 2018, pp. 436-441 [in Ukrainian].
- [15] N. E. Pankiv, and N. Z. Teterko, "Estimation of atmospheric air pollution due to congestion of Lviv streets by motor transport", *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, iss. 26.8, pp. 215-223, 2016 [in Ukrainian].

References

- [1] G. R. Fomenko, "Transport flows and their impact on the level of pollution of urban highways", *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*, vol. 31 (70), part 2, no. 3, pp. 119-123, 2020 [in Ukrainian].
- [2] O. Chernyshov, *The impact of transport on the ecology of the city. Analysis and strategies for Ukraine*. Kharkiv, Ukraine, 2016. [Online]. Available: <https://ucn.org.ua/wp-content/uploads/2017/02/transport> [in Ukrainian].
- [3] V. I. Guk, and Yu. M. Shkodovsky, *Transport streams: theory and its application in urban planning: monograph*. Kharkiv, Ukraine: Zoloti storinky, 2009 [in Ukrainian].
- [4] V. F. Babiy, V. M. Khudova, and O. Ye. Kondratenko, "Urgent problems of

L. B. Yashchuk, Ph.D., associate professor
e-mail: l_yashchuk@ukr.net
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

POSSIBILITIES OF CALCULATION MONITORING METHODS IN DETERMINING ECOLOGICAL EXPEDIENCY IN THE ORGANIZATION OF MUNICIPAL TRANSPORT FLOWS

Today road transport is one of the main sources of air pollution in cities. The increase in the level of pollution of built-up areas is the consequence of the increase in the number of vehicles. The application of a set of monitoring methods to determine the contribution of the transport network of urban agglomerations to air pollution and the development of measures to optimize traffic is an actual and promising area of research.

The assessment of environmental feasibility during the organization of road traffic in the city has been determined by calculating the emissions of vehicles at regulated intersections depending on traffic intensity. Using the calculation monitoring methods, the intensity of vehicle emissions in the studied areas in Cherkasy is analyzed.

In the area of regulated crossing there is a significant excess of pollutant emissions from vehicles. A significant part of the total emissions consists of carbon monoxide (50-65 %) and hydrocarbons (10-20 %). Exceedance of the permissible level of air pollution for all substances has been revealed in the area of the research sites. The largest exceedances of the maximum permissible concentrations (MPC) of pollutants have been observed on the streets with heavy traffic and a long time of the prohibitory signal of traffic lights. The largest exceedances of the maximum permissible concentrations have been observed on streets with heavy traffic and long-term stop light. For example, the intersection of Chornovola st. - Khimikiv ave. is characterized by medium traffic intensity, but has the highest values of pollutant emissions due to the significant duration of the stop light. It is proposed to reduce the signal time by 30 %, which will reduce the concentration of harmful substances, such as CO, NO₂, CH and SO₂, several times. No correlation has been observed between the intensity of traffic flows and emissions at regulated crossing.

The definition of the degree of air pollution within urban intersections has shown a significant impact of irrational and outdated operation of the transport network on the level of air pollution and the need to reform the transport system in Cherkasy. The system of ecological safety of atmospheric air in the city of Cherkasy requires improvements due to exceeding the actual values of pollution over regulatory parameters.

Recommendations for improving the environmental condition of intersections can be developed through the optimization of traffic flows using intelligent transport systems.

To eliminate the environmental problem of gas pollution at intersections, it is necessary to reduce the intensity of traffic flows through transport interchanges.

Environmental security in the city of Cherkasy should be ensured by a wide range of interrelated measures. They should form a kind of legal mechanism, which should be understood as a system of tools that can enhance the level of environmental safety, prevent the deterioration of the environmental situation at transport intersections and the danger to the population.

Keywords: atmospheric air, monitoring, motor transport, calculation methods, ecological standards.