

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

ЧЕРКАСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Технічні науки

Заснований у грудні 1996 р.

3/2021

Редакційна колегія:

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

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

Базіло К. В., д-р техн. наук, доцент

Батраченко О. В., д-р техн. наук, доцент

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

Бондаренко Ю.Ю., канд. техн. наук, професор

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

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

Вязовик В. М., д-р техн. наук, доцент

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

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

Кажіс Р., д-р техн. наук, професор

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

Лобода О. А., д-р хім. наук

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

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

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

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

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

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

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

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

ЗАСНОВНИК І ВИДАВЕЦЬ – Черкаський
державний технологічний університет

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

Виходить 4 рази на рік

У ВИПУСКУ:

**АВТОМАТИЗАЦІЯ
ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

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

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

3•2021

ВІСНИК

**Черкаського державного
технологічного університету**

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

VISNYK

**Cherkaskogo derzhavnogo
tehnologichnogo universitetu**

TECHNICAL SCIENCE

3 • 2021

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

**Видання зареєстровано
у міжнародних наукометричних базах,
каталогах і системах пошуку:**
Index Copernicus Journals Master List,
BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref,
Directory of Open Access Journals (DOAJ),
Eurazian 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 № 4 від 18.10.2021

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

ЗМІСТ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

<i>Уткіна Т. Ю., Кісельов В. Є., Рябцев В. Г.</i> Система автоматичного управління освітленням птахофабрики в режимах «світанок-захід»	5
<i>Берестов Р. В., Гоц Н. Є.</i> Дослідження методів вимірювання активності радіонуклідів для калібрування джерел α -, β -, γ -випромінювання.....	14
<i>Кобиць І. С., Бруньов О. О., Андрієнко О. І., Білокінь С. О., Ротте С. В., Бондаренко М. О.</i> Дослідження функціональних поверхонь мехатронних пристроїв методом мультizonдової атомно-силової мікроскопії	24

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Лавданський А. О., Фауре Е. В., Щерба В. О.</i> Підвищення швидкості операції множення перестановок за рахунок використання SIMD інструкцій	36
<i>Бабенко В. Г., Миронюк Т. В., Кривоус Г. В.</i> Алгоритми застосування операцій перестановок, керованих інформацією, для реалізації криптоперетворення інформації.....	44
<i>Кучерук О. Я., Драч І. В.</i> Оптимізаційний підхід в задачі маршрутизації комплектувальника	59
<i>Ромашко С. В., Харенко В. Б., Підгорний М. В., Литовченко В. В.</i> Моделі руху автотранспортних засобів при поздовжніх зіткненнях.....	69
<i>Батурінець А. Г., Антоненко С. В.</i> Подовження рядів даних за значеннями показників схожих рядів	78

CONTENTS

AUTOMATION AND CONSTRUCTION OF DEVICES

<i>Utkina T. Yu., Kiselyov V. E., Ryabtsev V. G.</i> System of automatic control of poultry factory lighting in "sunrise-sunset" modes	5
<i>Berestov R. V., Hots N. E.</i> Research of methods of measurement of radionuclide activity for calibration of α -, β -, γ -radiation sources	14
<i>Kobyts I. S., Brunov O. O., Andriienko O. I., Bilokin S. O., Rotte S. V., Bondarenko M. O.</i> Investigation of functional surfaces of mechatronic devices by multiprobe atomic force microscopy	24

INFORMATION TECHNOLOGIES

<i>Lavdanskyy A. O., Faure E. V., Shcherba V. O.</i> Increasing the speed of the permutation multiplication operation due to use of SIMD instructions	36
<i>Babenko V. H., Myronyuk T. V., Kryvov H. V.</i> Algorithms for application of permutation operations controlled by information for implementation of cryptographic transformation of information	44
<i>Kucheruk O. Ya., Drach I. V.</i> Optimization approach in the routing problem	59
<i>Romashko S. V., Kharenko V. B., Pidhornyy M. V., Lytovchenko V. V.</i> Models of movement of vehicles in longitudinal collisions	69
<i>Baturinets A. H., Antonenko S. V.</i> Lengthening the data series by values of similar data series samples	78

[0000-0002-6614-4133] **Т. Ю. Уткіна**¹, канд. техн. наук, доцент,

e-mail: t.utkina@chdtu.edu.ua

[0000-0002-1568-8616] **В. Є. Кісельов**²,

[0000-0002-0592-2413] **В. Г. Рябцев**², д-р техн. наук, професор

¹ Черкаський державний технологічний університет

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

² ООО «ДП СВ «Альтера», м. Черкаси

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ОСВІТЛЕННЯМ ПТАХОФАБРИКИ В РЕЖИМАХ «СВІТАНОК-ЗАХІД»

Освітлення відіграє важливу роль при виробництві яєць і м'яса птиці. Нині для електричного освітлення в пташниках в основному використовують люмінесцентні лампи, але все більшого поширення набувають світлодіодні джерела. У статті розглянуті структура та програмне забезпечення автоматичного управління освітленням птахофабрики в режимах «світанок-захід», які було реалізовано на основі програмованого реле ОВЕН ПР200. Розроблено методичку розрахунку функціональної залежності напруги на вході димера від тривалості світлового дня та тривалості режимів «світанку» і «заходу» в приміщенні птахофабрики. Проведено моделювання програми управління димером, реалізованої на мові функціональних блоків FBD. Зміни освітленості, тривалості освітлення і спектрального складу світла безпосередньо пов'язані з відтворювальною функцією птахів. Світлодіодне освітлення для птахофабрик і ферм має множинну беззаперечних переваг: скорочує витрати на електроенергію в кілька разів; збільшує тривалість періоду несучості та кількість яєць у птиці; витрати кормів зменшуються, а їх засвоєння поліпшується; збільшується відсоток виживання молодняка; знижується загальний травматизм птиці; позитивно впливає на вихід запліднених яєць; зменшує яєчний бій.

Ключові слова: час доби, димер, програмоване реле, світловий день, світлодіод, таймер, функціональні блоки.

Вступ. Особливістю сучасного птахівництва є його промисловий характер, що дозволяє комплексно механізувати й автоматизувати технологічні процеси. Сучасні птахофабрики відзначаються високою щільністю посадки, високопродуктивними породами, інтенсивними способами утримання курей. В таких умовах особливого значення набуває оптимізація всіх факторів навколишнього середовища відповідно до потреб птиці. Однак багато питань, безпосередньо пов'язаних з проблемою розмноження та продуктивності птиці, залишаються поки недостатньо вивченими. В умовах інтенсивного виробництва всі фактори утримання істотно впливають на продуктивність птиці. Одним із таких факторів є світло [1-3].

Зміни освітленості, тривалості освітлення та спектрального складу світла безпосередньо пов'язані з відтворювальною функцією птиці. Освітлення в пташнику відіграє важливу роль при вирощуванні курей всіх напрямків і дозволяє управляти процесами

фізіологічного розвитку птиці, забезпечити більш комфортні умови її утримання і домогтися істотного зростання практично всіх показників продуктивності птиці.

Різкі ввімкнення освітлення лякають птицю, а при щільному підлоговому або клітинному триманні можуть призводити до травматизму. Сьогодні практично всі великі птахові підприємства використовують переваги переривчастих режимів освітлення.

У промисловій практиці для вирощування молодняка успішно застосовувалася тривалість світлового дня від 8 до 16 год. Тривалість світлового дня 8 год. – це, ймовірно, найбільш використовувана програма з постійною тривалістю світлового дня. Ця програма помірно обмежує вік статевого дозрівання й дозволяє впливати, прискорюючи або затримуючи, на статеве дозрівання курчат. Плавне збільшення тривалості світлового дня дозволяє значно прискорити статеве дозрівання птиці, а також стимулювати початок кладки яєць, а поступове її зменшення в пері-

од вирощування істотно затримує статеве дозрівання.

Існує велика кількість програм освітлення, що дозволяють значно підвищити ефективність вирощування птиці як яєчного, так і м'ясного напрямків. Однак у кожному конкретному випадку програма повинна складатися, виходячи з поточних умов годівлі, утримання та економічних вимог до процесу вирощування.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності електричного технологічного освітлення пташників батьківського стада шляхом наукового обґрунтування методів контролю освітленості та розробки автоматичних засобів регулювання світлового потоку.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- вибрати структуру системи автоматичного керування освітленням птахофабрики в режимах «світанок-захід»;
- визначити функціональні залежності зміни напруги на виході реле для управління димером;
- розробити програму управління яскравістю освітлення приміщення пташника.

Виклад основного матеріалу. Застосування регулювання освітлення в пташнику дозволяє підвищити продуктивність, особливо, курей-несучок. Очевидно, що для вирішення питань вдосконалення систем електричного освітлення пташників необхідно, перш за все, враховувати спектральну чутливість зору птиці. Це дозволить сформулювати вимоги до спектрального складу джерела світла, до технічних засобів регулювання його світлового потоку [4-6]. Тобто рішення задачі оптимізації технологічного освітлення складається з більш повного задоволення фізіологічних вимог птиці до світла, обумовлених спектральною чутливістю очей курей, та з досліджень і розробок технічних засобів регулювання й управління освітлювальною установкою [7-10].

Кожний колір по-своєму впливає на фізіологію птиці. Зелене світло, наприклад, значно збільшує швидкість росту в ранньому віці за рахунок збільшення проліферації сателітних клітин скелетних м'язів. Синє світло збільшує ріст у більш старшому віці за рахунок підвищення рівня андрогенів у плазмі. Вузькосмугове синє світло знижує пересування. Це також знижує рівень канібалізму, особливо у курчат-бройлерів, вирощуваних для споживання людиною. Разом зелене і синє

світло сприяють зростанню міофібрил за рахунок більш ефективної стимуляції секреції тестостерону. В цілому було показано, що синє світло поліпшує конверсію корму до 4 %, тим самим знижуючи вартість корму до 3 % і збільшуючи загальну живу масу до 5 % [8, 16].

Типи режимів освітлення. Режими освітлення пташників можна умовно розділити на режими з одним світловим періодом та на переривчасті режими освітлення. Переривчасті режими освітлення використовуються як при вирощуванні курей-несучок, так і при вирощуванні бройлерів.

Всі режими переривчастого освітлення умовно можна розділити на два типи: режими переривчастого освітлення асиметричного типу і режими переривчастого освітлення симетричного типу. Птиця реагує на них зовсім по-різному.

Режими переривчастого освітлення асиметричного типу сприймаються стадом курей як одноразова зміна дня і ночі. Встановлено, що, з точки зору споживання корму, овуляції і кладки яєць в режимах переривчастого освітлення цього типу, кури найбільший період темряви сприймають як ніч, а наступний за ним світловий період – як початок «суб'єктивного» дня, або як «світанок». Решту коротких періодів темряви птиця ігнорує і поряд зі світловими періодами сприймає як тривалий світловий день. Відбувається загальна синхронізація кладки яєць у стаді, тобто ритм кладки яєць збігається з «суб'єктивним» днем.

Режими переривчастого освітлення симетричного типу не мають чіткої межі між «суб'єктивним» днем і «суб'єктивною» ніччю, оскільки всі періоди світла й темряви рівні за тривалістю. Встановлено, що при цьому в стаді курей відбувається десинхронізація кладки яєць, тобто вона триває протягом 24 год. При використанні режимів переривчастого освітлення симетричного типу в цілому яєчна продуктивність знижується, з одночасним підвищенням маси яєць і поліпшенням якості шкаралупи.

Вибір спектра освітлення домашньої птиці. На рисунку 1 показано, що домашня птиця бачить та реагує на інший діапазон колірного спектра світла і має різні відповіді за спектральною інтенсивністю, ніж люди. У той час як люди реагують на світло з довжиною хвилі близько 410-660 нм, курчата можуть бачити світло в діапазоні 315-750 нм.

Кури вловлюють світло не тільки через рецептори колб сітківки очей, але також через додаткові фоторецептори сітківки в шишкоподібній залозі і гіпоталамічній залозі. Люди триколірні й мають колбочки сітківки, які можуть визначати червоний, зелений і синій кольори. Курчата чотирьохколірні, з додатковим подвійним конусом, функція якого може бути пов'язана з відстеженням руху. У домашньої птиці червоне світло життєво важливе для стимулювання статеві зрілості та несучості. Птиця, яка зазнала впливу червоного світла порівняно з синім, зеленим або білим

світлом, завжди має більш високу несучість, ніж птиця інших кольорних груп. Червоне світло стимулює додаткові фоторецептори сітківки. Червоне світло (близько 650 нм) проникає в гіпоталамус в 4-50 разів ефективніше, ніж синє, зелене і жовто-оранжеве світло. Гіпоталамус відіграє важливу роль у регулюванні вироблення гормонів, важливих для виробництва яєць. Світло можна використовувати як інструмент управління, щоб допомогти оптимізувати ріст молодняку, прискорити статеву зрілість, збільшити вагу яйця та несучість у курей-несучок в різних умовах.

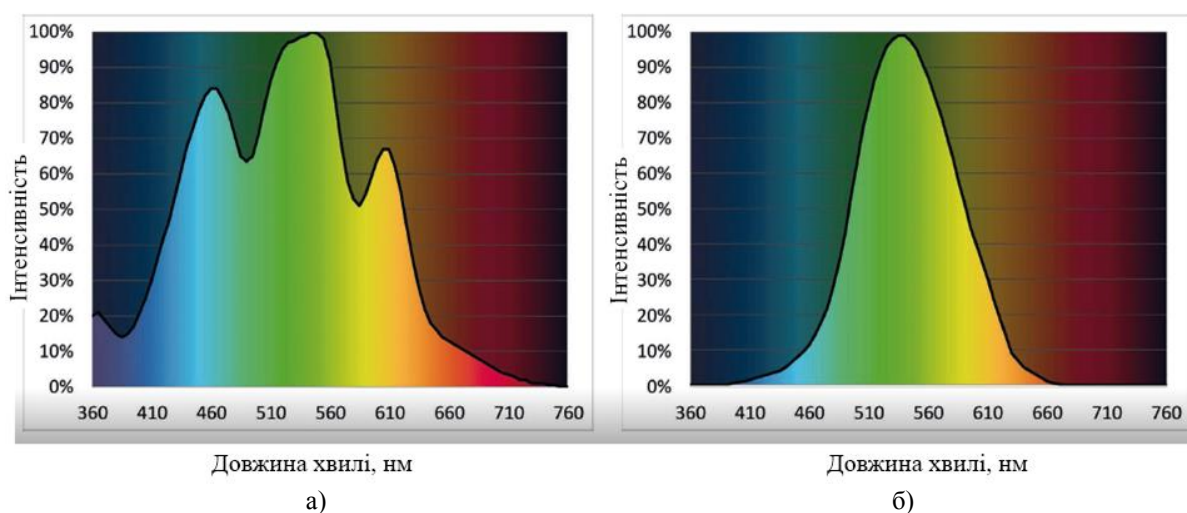


Рисунок 1 – Фотооптичні спектральні відгуки:
а) домашньої птиці; б) людини

Розуміння кольорного спектра, випромінюваного джерелом світла, допоможе виробникам вибрати лампочку, яка може випромінювати необхідну кількість червоного, зеленого та синього світла. Колір лампочки може бути виражений в градусах Кельвіна (K) та інтенсивності кольору (CRI).

Дослідження на бройлерах показали, що сині і зелені світлодіоди прискорюють ріст. Дослідження несучок показують, що світлодіодні лампи з більшою часткою синього і зеленого спектра приводять до кращої ваги тіла й однорідності порівняно з лампами розжарювання [11]. В цілому, молодняк можна вирощувати при теплому або прохолодному освітленні, але у курей-несучок повинне бути освітлення з достатнім корисним спектром (2700-3000 K).

Виробники лампочок зазвичай надають інформацію про градуси Кельвіна, можна також використовувати спектрометр.

Для освітлення пташників рекомендується застосовувати світлодіодну лампу E27 моделі HT-QPF10WS з напругою, що димерується, 180-265 В змінного струму. Колір лампочки – 4700-5300 K, кут променя становить 300 градусів.

Зовнішній вигляд світлодіодної лампи E27 наведено на рисунку 2.



Рисунок 2 – Світлодіодна лампа E27

Підтримка рівномірної інтенсивності світла на сучасній птахофабриці може бути важкою справою. Для вимірювання розподілу світла в звичайних клітках або пташниках з гнйовими стрічками ідеально проводити вимірювання у годівниці через кожні 25 см між ліхтарями й на кожному рівні. Зазвичай для точної оцінки розподілу світла потрібно від 30 до 100 світлових відліків. У підлогових пташниках необхідно вимірювати у стіни, на лініях годівниць та поїлок під світильниками й 2-3 рази між світильниками, всього від 10 до 50 вимірювань. У відкритих пташниках використовують віконні штори, щоб в приміщення не потрапляли прямі сонячні промені. Навіть після цих заходів інтенсивність освітлення у відкритих пташниках може легко досягати 1000 Лк.

Розробка структури автоматичного управління освітленням птахофабрики. До складу апаратних засобів системи автоматичного управління освітленням птахофабрики, структура якої приведена на рисунку 3, включено димер світлодіодного освітлення потужністю 4500 Вт, який імітує світанок і захід для птахофабрики, та програмоване реле ОВЕН ПР200-220.2 (4). Вхідна напруга димера – 180-260 В змінного струму. За допомогою реле ПР200 формується напруга 0-10 В, що забезпечує управління освітленням 24 год. на добу. Автоматична система забезпечує затемнення від 0 до 100 % при яскравості освітлення від 1 до 100 %.



Рисунок 3 – Структура апаратних засобів

Програмоване реле ОВЕН ПР200 є спеціалізованою розробкою та призначене для побудови локальних систем управління технологічними процесами. Реле ПР200 має вбудований РК-дисплей з видимою областю 2 рядки по 16 символів, що підтримує відображення латинських і кирилических символів (кодування Windows-1251), 6 функціональних кнопок для управління екранами та 2 інди-

тори. Середовище програмування OWENLogic робить програмування реле простим й інтуїтивно зрозумілим. Запис алгоритму роботи до пам'яті реле здійснюється з використанням функціональних блоків FBD [12-14].

Для запису програми до приладу використовується стандартний MiniUSB-кабель. Для інтеграції в SCADA-системи та управління зовнішніми пристроями в приладі може бути встановлено до двох інтерфейсів RS-485 з підтримкою протоколів Modbus RTU/ASCII [15].

Методика та загальна схема експериментів. Для ввімкнення та вимкнення освітлення в пташнику застосований інтервальный таймер CLOCKWEEK з тижневим циклом, який працює з годинником реального часу. Для фіксування поточного часу застосований універсальний лічильник CTN1, на тактовий вхід якого від генератора BLINK надходять прямокутні імпульси з періодом 1 с. Дані з виходу лічильника CTN1 перетворюються в формат з плаваючою точкою. Час «світанку» встановлено 18 хв. У режимі «світанок» напруга реле ОВЕН ПР200 формується відповідно до рівняння:

$$y = \frac{1}{108} \cdot x, \quad (1)$$

де x – поточний час;
 y – напруга на виході реле.

У режимі повного освітлення пташника напруга на виході реле ОВЕН ПР200 встановлюється рівною 10 В.

Для формування рівняння, за яким обчислюється напруга на виході реле ОВЕН ПР200 в режимі «захід», скористаємося формулою канонічного рівняння прямої, що проходить через дві точки:

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}. \quad (2)$$

Підставимо в формулу координати точок:

$$\frac{x - 42120}{43200 - 42120} = \frac{y - 10}{0 - 10}. \quad (3)$$

В результаті отримуємо рівняння прямої з кутовим коефіцієнтом:

$$y = -\frac{x}{108} + 400. \quad (4)$$

Графік зміни напруги на виході реле в режимі «світанок» відповідно до рівняння (1) наведено на рисунку 4.

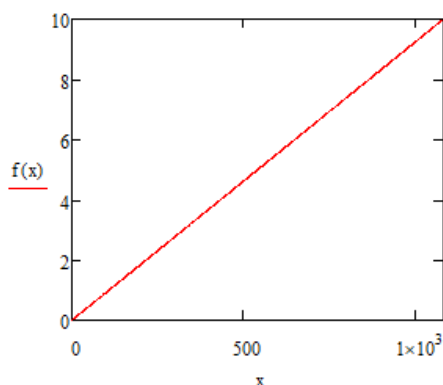


Рисунок 4 – Графік зміни напруги на виході реле відповідно до рівняння (1)

Графік зміни напруги на виході реле в режимі «захід» відповідно до рівняння (4) наведено на рисунку 5. В цьому режимі напруга на виході реле має плавно зменшуватися від 10 В до 0.

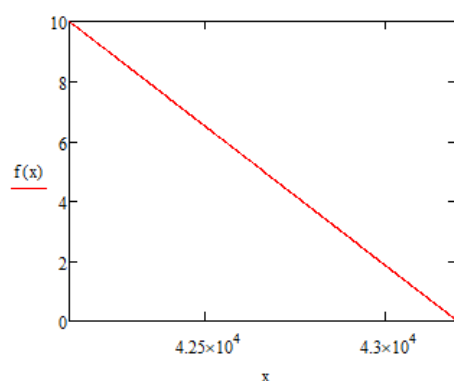


Рисунок 5 – Графік зміни напруги на виході реле відповідно до рівняння (4)

Особливості розробки програмного забезпечення. Для організації видачі керуючих впливів на димер залежно від дня тижня і поточного часу застосований тижневий таймер. Таймер автоматично визначає поточний день тижня за входами «Рік», «Місяць», «День», на які необхідно подати сервісні змінні годин реального часу. Поточний час на таймер заводиться через входи «Години» і «Хвилини».

Функціональні залежності зміни напруги на виході реле за рівняннями (1) та (2) були застосовані при розробці програми управління димером.

Збільшення напруги на виході реле забезпечується арифметичною операцією ділення поточного часу, представленого у форматі з плаваючою точкою, на число 108.

У середовищі програмування OWENLogic на мові функціональних блоків FBD розроблена програма формування напруги на виході реле ПР200 в режимі «захід», наведена на рисунку 6.

Для формування напруги в режимі «захід» на мові функціональних блоків FBD розроблена програма, наведена на рисунку 6.

Коли змінна var0, рівна значенню поточного часу, менша числа 42120, на вихід реле видається значення змінної var2, рівне 10 В. Коли значення змінної var0 збільшиться відносно числа 42120, значення змінної var3 буде обчислюватися за формулою (4) за допомогою блоків арифметичної операції ділення fDIV, множення fMUL і додавання fADD чисел з плаваючою точкою. Обчислення значення змінної var3 передається на аналоговий вихід реле AO1. Для завершення світлового дня в пташнику блок порівняння чисел з плаваючою точкою fGT перемикає селектор fSEL в режим передачі на вихід реле напруги, рівної 0 В.

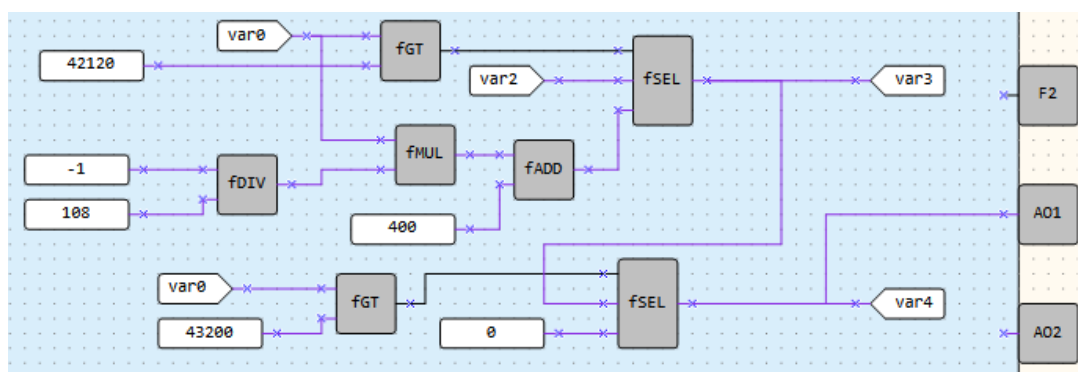


Рисунок 6 – Програма управління режимом «захід»

Використовуючи режим емуляції серведовища програмування OWENLogic, можна переконатися, що програма працює відповідно до розробленого алгоритму.

Результати досліджень. Тривалості «світанку» і «заходу» за програмою задані як 18 хв. Для підрахунку кількості тактів реального часу обраний генератор імпульсів з періодом 1 с. Проте тривалість циклу роботи програми, виміряна макросом CycleTime1, становить 100 мс, тому тривалість режиму «світанок» збільшена на 108 с і становить 19,8 хв. На стільки ж збільшено тривалість режиму «захід».

Реальна зміна напруги на виході реле в режимі «світанок» відрізняється від значень, наведених на рисунку 4, і буде ступінчастою. Вона збільшується на 9,26 мВ через кожні 1,1 с. На таке ж значення з дискретністю часу 1,1 с буде зменшуватися напруга в режимі «захід», проте мерехтіння світла буде непомітно для очей людини і птиці.

Смність програми управління освітленням пташника в режимах «світанок-захід» становить 1 Мбайт.

Обговорення результатів. Можливі три режими роботи системи автоматичного управління освітленням птахофабрики: при 100 %, 92,5 % і 85 % яскравості освітлення в зимовий, весняно-осінній і літній періоди року відповідно. Для цього в програмне реле ПР200 потрібно завантажити три програми, які активізуються відповідними кнопками на панелі управління, сигнали від яких подаються на дискретні входи реле.

Для різних режимів роботи в програмах реле для забезпечення обраної яскравості освітлення необхідно ввести зміни, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Зміни в програмах реле

Період року	Напруга на виході реле, В	Управління для	
		«світанок»	«захід»
літо	8,5	$y = \frac{17}{2160} \cdot x$	$y = -\frac{17x}{2160} + 340$
весна/осінь	9,25	$y = \frac{37}{4320} \cdot x$	$y = -\frac{37x}{4320} + 370$
зима	10	$y = \frac{1}{108} \cdot x$	$y = -\frac{x}{108} + 400$

Ці зміни дозволяють заощадити електроенергію навесні/восени на 7,5 %, а влітку –

на 15 %. Мінімальна яскравість освітлення для вирощування молодняка становить 5 Лк, виміряна біля годівниці. При утриманні курей на підлозі багато закордонних фірм рекомендують освітленість 20-25 Лк.

Висновки. Світлодіодні лампи дозволяють зменшити витрату електроенергії на 85 % порівняно з лампами розжарювання і на 50 % порівняно з люмінесцентними лампами, крім того, термін їх роботи в кілька разів довший. Іншими перевагами світлодіодних систем освітлення є можливість регулювання рівня освітленості від нуля до номіналу, можливість отримання світла будь-якого спектра, відсутність у складі токсичних речовин, високий рівень захисту від негативних зовнішніх впливів.

Наукова новизна статті полягає у формуванні математичних залежностей управляючих сигналів від часу доби, що застосовуються для автоматичної зміни освітленості пташника в режимах «світанок-захід».

Освітлення в пташнику відіграє важливу роль при вирощуванні курей всіх напрямків та дозволяє управляти процесами фізіологічного розвитку птиці, забезпечити більш комфортні умови її утримання й домогтися істотного зростання практично всіх показників продуктивності птахів.

Правильно організована система освітлення разом з правильно спроектованою програмою освітлення:

- 1) зменшує витрати електроенергії в 1,5-3 рази;
- 2) прискорює статеве дозрівання і забезпечує оптимальний режим розвитку птиці;
- 3) збільшує несучість і тривалість періоду кладки яєць;
- 4) збільшує розмір яєць, їх масу, міцність шкаралупи, заплідненість;
- 5) дозволяє знизити бій яєць;
- 6) збільшує виживаність молодняка;
- 7) знижує витрати кормів і покращує їх засвоюваність;
- 8) знижує травматизм у птиці.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні промислових систем автоматичного управління переривчастим режимом освітлення приміщень птахофабрик.

Перспективи подальших досліджень. Розроблена структура автоматичного управління освітленням птахофабрики дозволяє легко змінювати режими освітлення завдяки завантаженню відповідних світлових програм управління, адже світлові програми для брой-

лерів і ясної птиці мають відрізнятися як за тривалістю світлового дня, так і за інтенсивністю.

При заселенні добових курчат у пташник всім видам курей необхідне яскраве світло та довгий світловий день. Так курчата краще знаходять корм і воду, звикають один до одного й до обстановки в приміщенні.

Перші 5-7 днів для бройлерів і 7-14 днів для ремонтного молодняку дають лише одну годину темряви й підтримують яскравість 40-50 Лк. Далі застосовують програми залежно від того, що ставиться за мету.

Стосовно дорослої курки-несучки, то світловий день для неї повинен тривати 13-14 год. на добу при інтенсивності освітлення 10-20 Лк, що дорівнює приблизно 6 Вт на квадратний метр підлоги.

Відтак, впровадження запропонованого рішення забезпечить урахування конкретних вимог замовника до вирощування домашньої птиці та підвищить ефективність електричного технологічного освітлення пташників за рахунок реалізації автоматичних засобів регулювання й контролю світлового потоку.

Список використаних джерел

- [1] О. П. Гречанов, "Ефективні режими освітлення у пташнику", *Сучасне птахівництво*, № 7, с. 16-18, 2005.
- [2] Я. Г. Гезалов, "Ультрафіолетовое облучение как фактор обеззараживания воздуха в птицеводческих помещениях", *Зоотехния*, № 10, с. 27-28, 2012.
- [3] А. Григорьева, М. Еловая, "Обзор систем управления и источников сельскохозяйственного освещения отечественного производства", *Полупроводниковая светотехника*, № 3, с. 24-29, 2018.
- [4] Ю. Давиденко, "Современные светодиоды", *Компоненты и технологии*, № 6, с. 38-43, 2004.
- [5] Е. Б. Дудин, "Светоизлучающие диоды – революция в технологии освещения", *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*, № 6, с. 99-106, 2007.
- [6] Каталог светодиодного оборудования. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ntp-ts.ru/equipment/>
- [7] Специфическое освещение в курятнике – ультрафиолетовое, инфракрасное, красное [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ultrafiolet.guru/uv-dlja-rastenij-i-zhivotnyh/poisk-mochizhivotnyh/dlja-kur>
- [8] Е. А. Шабаев, А. С. Касьянов, "Разработка системы светодиодного освещения в птичнике с клеточным содержанием птицы", *Вестник аграрной науки Дона*, №4 (16), с. 15-21, 2011.
- [9] Л. Ю. Юферев, Д. А. Баранов, А. А. Михалев, "Применение энергоресурсосберегающей системы освещения и УФ облучения помещений для содержания птицы", *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, № 2, с. 19-21, 2012.
- [10] Л. Ю. Юферев, "Ультрафиолетовые светодиоды для стимулирования продуктивности животных и птицы", *Техника в сельском хозяйстве*, № 4, с. 15-16, 2009.
- [11] Д. В. Гладин, "Влияние светодиодного освещения различной цветовой температуры и способа размещения источников света на сохранность и живую массу яичных кур", *Эффективное животноводство*, № 9, с. 40-41, 2018.
- [12] В. Е. Зюбин, "Программирование ПЛК: языки МЭК 61131-3 и возможные альтернативы", *Промышленные АСУ и контроллеры*, № 1, с. 31-35, 2005.
- [13] И. З. Альтерман, А. А. Шалыто, "Формальные методы программирования логических контроллеров", *Промышленные АСУ и контроллеры*, № 11, с. 49-52, 2005.
- [14] И. В. Петров, *Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования* / под ред. проф. В. П. Дьяконова. Москва, Россия: СОЛОН-Пресс, 2004.
- [15] Дж. Х. Христенсен, "Знакомство со стандартом на языки программирования PLC: IEC 1131-3 (МЭК 1131-3)". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.asutp.ru>
- [16] T. R. Morris, M. Midgley, E. A. Butler, "Effect of age at starting biomittent lighting on performance of laying hens", *British Poultry Science*, vol. 31, no. 3, pp. 447-455, 1990.

References

- [1] O. P. Grechanov, "Effective modes of illumination in poultry house", *Suchasne ptakhivnistvo*, no. 7, pp. 16-18, 2005 [in Ukrainian].

- [2] Ya. G. Gezalov, "Ultraviolet irradiation as a factor of air disinfection in poultry premises", *Zootekhniya*, no. 10, pp. 27-28, 2012 [in Russian].
- [3] A. Grigorieva, M. Elovaya, "Review of control systems and sources of agricultural lighting of domestic production", *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*, no. 3, pp. 24-29, 2018 [in Russian].
- [4] Yu. Davidenko, "Modern LEDs", *Komponenty i tekhnologii*, no. 6, pp. 38-43, 2004 [in Russian].
- [5] E. B. Dudin, "Light-emitting diodes – a revolution in lighting technology", *Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnikh resursov*, no. 6, pp. 99-106, 2007 [in Russian].
- [6] Catalog of LED equipment. [Online]. Available: <https://ntp-ts.ru/equipment/> [in Russian].
- [7] Specific lighting in the chicken coop is ultraviolet, infrared, red. [Online]. Available: <https://ultrafiolet.guru/uv-dlja-rastenij-i-zhivotnyh/poisk-mochizhivotnyh/dlja-kur> [in Russian].
- [8] E. A. Shabaev, A. S. Kasyanov, "Development of a LED lighting system in poultry house with caged poultry", *Vestnik agrarnoy nauki Dona*, no. 4 (16), pp. 15-21, 2011 [in Russian].
- [9] L. Yu. Yuferev, D. A. Baranov, A. A. Mikhailov, "Application of an energy-saving system of lighting and UV irradiation of premises for keeping poultry", *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva*, no. 2, pp. 19-21, 2012 [in Russian].
- [10] L. Yu. Yuferev, "Ultraviolet light-emitting diodes for stimulating the productivity of animals and poultry", *Tekhnika v selskom khozyaystve*, no. 4, pp. 15-16, 2009 [in Russian].
- [11] D. V. Gladin, "Influence of LED lighting of different color temperatures and the method of placement of light sources on the safety and live weight of egg chickens", *Effektivnoye zhivotnovodstvo*, no. 9, pp. 40-41, 2018 [in Russian].
- [12] V. E. Zyubin, "PLC programming: IEC 61131-3 languages and possible alternatives", *Promyshlennyye ASU i kontrolyery*, no. 1, pp. 31-35, 2005 [in Russian].
- [13] I. Z. Alterman, A. A. Shalyto, "Formal methods of programming of logic controllers", *Promyshlennyye ASU i kontrolyery*, no. 11, pp. 49-52, 2005 [in Russian].
- [14] I. V. Petrov, *Programmable Controllers. Standard Languages and Techniques for Applied Design*, prof. V. P. Dyakonov, Ed. Moscow, Russia: SOLON-Press, 2004 [in Russian].
- [15] J. H. Christensen, "Introduction to the PLC programming language standard: IEC 1131-3 (IEC 1131-3)". [Online]. Available: <http://www.asutp.ru> [in Russian].
- [16] T. R. Morris, M. Midgley, E. A. Butler, "Effect of age at starting biomittent lighting on performance of laying hens", *British Poultry Science*, vol. 31, no. 3, p. 447-455, 1990.

T. Yu. Utkina¹, Ph. D., Associate Professor,
e-mail: t.utkina@chdtu.edu.ua

V. E. Kiselyov²,

V. G. Ryabtsev², Dr. Tech. Sc., Professor

¹Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

²"LLC DP SV "Altera", Cherkasy

SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF POULTRY FACTORY LIGHTING IN "SUNRISE-SUNSET" MODES

Lighting in the poultry house plays an important role in raising chickens of all directions and allows to control the processes of physiological development of poultry, provide more comfortable conditions for its keeping and achieve a significant increase in almost all indicators of poultry productivity, and also to increase the survival rate of chicken, reduce feed costs and improve their digestibility, reduce injuries in poultry and decrease electricity consumption by 1.5-3 times. Besides, one of the factors that can negatively affect the poultry's condition is a sharp turning on/off lighting. Therefore, it is desirable to provide a smooth "sunrise-sunset" in the poultry house, especially for laying hens.

Moreover, it is not recommended to raise chickens under constant lighting. The article proposes the structure of an automatic lighting system in the "sunrise-sunset" modes, consisting of a programmable relay PR200 and a dimmer of LED lighting with a capacity of 4,500 W, which simulates the sunrise and sunset in a poultry farm. Programming of the PR200 relay does not require special skills, since it is carried out using a simple and intuitive programming environment OWENLogic. The algorithm of equipment operation is created in the language of FBD functional blocks which are contained in the attached library. The program is written into the relay memory using a standard MiniUSB-cable. Mathematical dependences of control signals on time of day and the chosen mode of change of illumination of a poultry house in the "sunrise-sunset" modes have been formed. The voltage at the output of the relay increases by 9.26 mV every 1.1 seconds. The voltage will decrease by the same value with a time resolution of 1.1 seconds in the "sunset" mode, however, the flickering of light will be imperceptible to the eyes of people and poultry. There are three operation modes of the automatic control system for lighting the poultry farm: at 100 %, 92.5 % and 85 % of the brightness of lighting in the winter, spring/autumn and summer seasons of the year, respectively. To do this, one of three programs must be loaded into the PR200 software relay that can be activated by corresponding buttons on the control panel, the signals from which are fed to the digital inputs of the relay. These changes will save electricity in spring/autumn by 7.5 %, and in summer by 15 %.

Keywords: time of day, dimmer, programmable relay, daylight, LED, timer, function blocks.

[0000-0001-6368-7362]

Р. В. Берестов, аспірант,

e-mail: ruslan.v.berestov@lpnu.ua

ДП «КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ»

вул. Січневого прориву, 84, м. Біла Церква, 09113, Україна

[0000-0003-2666-2187]

Н. Є. Гоц, д-р техн. наук, професор,

професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій

e-mail: nataliia.y.hots@lpnu.ua

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ АКТИВНОСТІ РАДІОНУКЛІДІВ ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ ДЖЕРЕЛ α -, β -, γ -ВИПРОМІНЕННЯ

В статті розглянуто методи вимірювання активності джерел іонізуючого випромінювання. Розглянуто нормативні документи, які нормують безпеку використання джерел іонізуючого випромінювання. На основі аналізу літератури сформовано класифікацію методів вимірювання активності радіонуклідів залежно від фізичного принципу реєстрації випромінювання. Зазначено вимоги до методів, які можуть бути застосовані для вимірювання активності джерел іонізуючого випромінювання під час їх калібрування, а саме: висока точність, а отже, непевність результатів вимірювання не перевищує 10 %, та простота їх технічної реалізації. Проведено аналіз літературних джерел щодо різних методів. Докладно розглянуто сцинтиляційний та іонізаційний методи і засоби їх реалізації. Визначено переваги сцинтиляційного та іонізаційного методів для практичного використання для калібрування джерел іонізуючого випромінювання і спектрометрів α -, β -, γ -випромінювання. Результати вимірювання активності радіонуклідів сцинтиляційним методом гамма-спектрометром СЕГ-05 та результати вимірювання активності радіонуклідів іонізаційним методом гамма-спектрометром ORTEC GEM-130 зображено на графіках. Отримані результати вимірювань, проведених цими методами, свідчать про те, що сцинтиляційний та іонізаційний методи вимірювання активності радіонуклідів найкраще підходять для застосування при калібруванні джерел іонізуючого випромінювання, оскільки непевність результатів вимірювання, проведених цими методами, не перевищує 7,5 % та є одного рівня.

Ключові слова: сцинтиляційний метод, напівпровідниковий метод, спектрометр, детектор, іонізуюче випромінювання.

Вступ. У міру розширення використання іонізуючого випромінювання (ІВ) в промисловості, медицині та науці збільшується і потенціальний ризик небезпеки для здоров'я людини, якщо джерело ІВ використовується або функціонує неналежним чином та ІВ потрапляє до організму людини.

Внутрішній вплив ІВ на людину відбувається за рахунок того, що радіонукліди вдихаються, поглинаються чи іншим чином потрапляють у кровообіг. Класифікацію впливу ІВ на людину, запропоновану Всесвітньою організацією охорони здоров'я, подано в таблиці 1 [1].

Внутрішній вплив іонізуючого випромінювання на людину завершується, лише коли радіонуклід виводиться із організму самостійно чи в результаті лікування.

Зовнішній вплив ІВ на людину відбувається внаслідок зовнішнього опромінення з джерела ІВ та припиняється в тому випадку, коли людина виходить за межі поля випромінювання цього джерела.

Безпека використання джерел ІВ нормується такими документами [2, 3, 4]:

- Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97);
- Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України (ОСПУ-2005);
- Державні санітарні правила і норми «Гігієнічні вимоги до влаштування та експлуатації рентгенівських кабінетів і проведення рентгенологічних процедур» (ДСанПіН 6.6.3-150-2007).

У зв'язку з широким використанням джерел іонізуючого випромінювання в медицині та промисловості та для створення безпечних умов практичної діяльності з джерелами іонізуючого випромінювання необхідно проводити їх калібрування, а саме перевірку їх метрологічних характеристик, зокрема активності радіонуклідів. Під час калібрування проводиться вимірювання активності джерела ІВ, що може бути реалізовано за допомогою різних методів вимірювання ІВ.

В промисловості для калібрування джерел ІВ використовуються засоби вимірювальної техніки – еталонні міри ІВ. Джерела ІВ характеризуються фізичною величиною – активністю радіонукліда відповідно α -, β -, γ -випромінювання. Активність джерела ІВ – це відношення кількості спонтанних ядерних переходів з визначеного ядерно-енергетичного стану радіонукліда dN , що відбуваються у відповідній його кількості за інтервал часу dt :

$$A = \frac{dN}{dt}. \quad (1)$$

В процесі калібрування еталонні джерела ІВ можуть застосовуватися у двох формах: як еталонні міри та як міри-компаратори.

Метою статті є формування класифікації та дослідження методів вимірювання активності радіонуклідів α -, β -, γ -випромінювання, які можуть бути застосовані в процесі калібрування джерел ІВ.

Задачі дослідження. Провести аналіз наявних методів вимірювання активності радіонуклідів. Визначити методи вимірювання активності, які мають точність вимірювання не більше 10 % та які можна було б застосувати для методу подовження терміну експлуатації джерел на основі результатів їх калібрування.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо методи вимірювання активності ІВ залежно від фізичного принципу реєстрації випромінювання. Загальну класифікацію методів вимірювання активності іонізуючого випромінювання подано в таблиці 2 [5, 6, 11]. Деякі з цих методів переважно використовуються в наукових дослідженнях, інші – в прикладній спекторметрії. Разом з тим деякі методи практично перестали використовуватися, напри-

клад метод фільтрів іонізуючого випромінювання. У той же час кристало-дифракційний метод і метод магнітного аналізу не набули значного поширення через технічні труднощі в їх реалізації. Кристало-дифракційний метод і метод магнітного аналізу належать до абсолютних, оскільки для визначення енергії використовуються незалежні способи вимірювань. Зазначені методи трудомісткі і зазвичай не дають змоги вимірювати спектр випромінювання в усьому енергетичному діапазоні одночасно.

Метод обмеженого тілесного кута застосовується в основному при вимірюванні α -випромінювання та низькоенергетичного фотонного випромінювання (від 1 до 80 кеВ). Водночас використовуються пропорційні лічильники, сцинтилятори із ZnS, тонкі кристали із CsI, а також напівпровідникові детектори. Мінімальна похибка вимірів активності оцінюється в 0,1 % для α -випромінювання та 1 % для фотонного випромінювання. Менш перспективним цей метод є для вимірювання активності за випромінюванням, оскільки наявність великої кількості поправочних коефіцієнтів збільшує похибку методу до 5–10 %.

Метод 4π -рахунку призначений для вимірювання активності α - та β -випромінюючих нуклідів. Він реалізується за допомогою лічильників Гейгера-Мюллера, пропорційних 4π -лічильників, монокристалічних сцинтиляційних детекторів, а також детекторів на основі рідких сцинтиляторів. Похибка визначення питомої активності α - та β -випромінювачів під час використання пропорційних лічильників оцінюється в 0,3–0,5 %, а за допомогою рідких сцинтиляторів – 0,2–0,3 % (для випромінювачів з максимальною енергією понад 150 кеВ) і 0,05–0,1 % (для випромінювачів). Для низькоенергетичних випромінювачів похибка вимірювання активності становить 1–3 %.

Метод внутрішнього наповнення, або метод внутрішнього газового рахунку, застосовується для зміни активності нуклідів з малою енергією часток (^1H , ^{14}C , ^{28}S та ін.). Використовуються пропорційні лічильники, в яких передбачені заходи щодо виключення кінцевого ефекту. Похибка вимірювання активності низькоенергетичних β -випромінювачів становить приблизно 1 %.

Таблиця 1 – Класифікація впливу ІВ на людину

Вплив ІВ	Джерела надходження ІВ
Запланований вплив ІВ, зумовлений навмисним використанням та роботою з джерелами випромінювання з конкретною метою	• медичні прилади для діагностування та лікування; • технічні об'єкти в промисловості; • наукові дослідження
Вплив наявних природних та промислових джерел ІВ, коли дія випромінювання вже існує і необхідно лише вжити відповідних заходів щодо контролю	• радон у житлових будинках; • робочі місця; • навколишнє середовище; • природні джерела
Вплив ІВ в надзвичайних ситуаціях, зумовлених непередбаченими подіями, які передбачають оперативні заходи	• техногенні катастрофи; • ядерні конфлікти; • зловмисні та терористичні дії

Таблиця 2 – Методи вимірювання активності радіонуклідів

Назва методу	Фізичний принцип
1. Метод абсолютного рахунку іонізуючих частинок	Метод вимірювання активності радіонуклідів, що базується на вимірюванні за допомогою відповідного детектора кількості іонізуючих частинок, що випускаються радіонуклідним джерелом всередині тілесного кута за певний інтервал часу
2. Метод 4π (2π)-рахунку	Метод абсолютного рахунку іонізуючих частинок, що здійснюється за допомогою 4π (2π)-детектора
3. Метод обмеженого тілесного кута	Метод абсолютного рахунку іонізуючих частинок, що здійснюється за допомогою лічильника, який реєструє іонізуючі частинки всередині тілесного кута, обмеженого діафрагмою
4. Метод внутрішнього наповнення	Метод абсолютного рахунку заряджених частинок, що здійснюється за допомогою введення радіоактивного зразка в рідкій або газовій фазі в детектор внутрішнього наповнення
5. Метод внутрішнього газового наповнення	Метод внутрішнього наповнення, що здійснюється за допомогою введення газового радіоактивного зразка в газовий іонізаційний детектор внутрішнього наповнення
6. Метод внутрішнього рідинного наповнення	Метод внутрішнього наповнення, що здійснюється за допомогою введення рідкого радіоактивного зразка в рідинний сцинтиляційний детектор
7. Метод трьох наповнень	Метод абсолютного рахунку фотонів характеристичного випромінювання електрозахватних радіонуклідів, що здійснюється за допомогою газорозрядного 4π -лічильника, наповнюється послідовно газом-наповнювачем і тим же газом з додаванням двох різних кількостей важкого інертного газу
8. Електростатичний метод вимірювання активності радіонуклідів	Метод абсолютного рахунку заряджених частинок, що здійснюється шляхом вимірювання електричного заряду, що виникає в радіонуклідному джерелі випромінювання в результаті вильоту з нього заряджених частинок, що випускаються при ядерному перетворенні радіонукліда
9. Метод збігів заряджених частинок і фотонів	Метод збігів, що здійснюється за допомогою роздільної реєстрації заряджених частинок і фотонів, що випускаються радіонуклідним джерелом випромінювання, в поєднанні з рахунком тимчасових збігів між ними
10. Метод збігів фотонів	Метод збігів, що здійснюється за допомогою роздільної реєстрації двома або більше детекторами різних фотонів, випускаються радіонуклідним джерелом випромінювання, в поєднанні з рахунком тимчасових збігів між ними
11. Індикаторно-екстраполяційний метод	Метод вимірювання активності бета-випромінюючих радіонуклідів, що базується на додаванні до радіонукліда відомої кількості бета-гамма-випромінюючого радіонукліда-індикатора і на зміні методом $4\pi\beta\gamma$ -збігів сумарної активності обох радіонуклідів з екстраполяцією результатів до 100 % -ї ефективності реєстрації бета-частинок 4π -лічильником

Метод збігів використовується для вимірювання активності нуклідів, розпад яких супроводжується випромінюванням одного або декількох фотонів γ - або рентгенівського випромінювання. При вимірюванні активності цим методом реєструються збіги між α -частинками та фотонами ($\alpha\gamma$ -збіги), між двома γ -квантами ($\gamma\gamma$ -збіги), між β -частинками і фотонами ($\beta\gamma$ -збіги) і т. д. Цей метод реалізується за допомогою установок збігів, що мають два вимірювальні канали, у кожному з яких використовується детектор з максимальною чутливістю до одного виду випромінювання. Вимірювальні канали працюють як у самостійному режимі, так і у режимі збігів.

Електростатичний метод базується на вимірюванні електричного заряду, накопиченого на ізольованому джерелі за рахунок винесення з нього заряду протилежного знака α - або β -частинками. Знаючи заряд, накопичений джерелом за певний час, і тип розпаду, можна визначити активність нукліду у джерелі. Оскільки цей метод не має жодних переваг перед іншими методами вимірювань і, крім того, є низка складнощів у його реалізації, він не отримав широкого застосування.

Аналіз методів абсолютних вимірювань активності нуклідів показує, що жоден із них не є універсальним. Кожний метод має свої переваги та недоліки.

Абсолютні методи вимірювань використовуються лише в наукових дослідженнях та в метрологічній практиці. В останньому випадку абсолютні методи реалізуються в еталонних установках. У всіх інших випадках використовують методи відносних вимірювань. Ці методи значно простіші в практичній реалізації, методика вимірювання в них не вимагає аналізу та оцінювання джерел похибки в тому обсязі, як це потрібно для абсолютних методів. Засоби вимірювань, що реалізують такі методи, відрізняють простота роботи з ними та порівняно невисока вартість.

Усі методи абсолютних вимірювань активності радіонуклідів можна зробити відносними, якщо градування приладів та установок здійснювати за допомогою зразків з відомим вмістом радіонукліду [8].

Основними вимогами до методів, які можуть бути застосовані для вимірювання активності джерел ІВ під час їх калібрування, є такі:

- висока точність, а отже, непевність результатів вимірювання не перевищує 10 %;
- простота їх технічної реалізації.

Подібними характеристиками наділені сцинтиляційний та іонізаційний методи.

На відміну від описаних вище методів, деякі з яких є занадто громіздкими для практичної реалізації, інші на цей час є застарілими, сцинтиляційний та іонізаційний методи постійно розвиваються та вдосконалюються. Як приклад можна навести антикомptonівську гамма-спектрометричну систему для проб навколишнього середовища [7].

Сцинтиляційний метод [6, 9, 10] базується на аналізуванні сцинтиляцій. Вони виникають у деяких речовинах при взаємодії цих речовин з іонізуючим випроміненням. Дотепер отримано багато речовин зі сцинтилюючими властивостями (рисунк 1). Їх розділяють: за хімічним станом – на органічні та неорганічні, за фізичним станом – на рідкі, газоподібні та тверді.



Рисунок 1 – Приклади сцинтиляторів

Основною властивістю сцинтиляторів є невеликий час висвічування. Загальний час спалаху в неорганічних сцинтиляторах становить приблизно 10^{-7} с. Ще менший час для органічних сцинтиляторів – 10^{-7} - 10^{-9} с. Друга особливість – пропорційність між інтенсивністю спалаху та енергією, що втрачена іонізуючою часткою чи квантом у сцинтиляторі. Також важливо те, що можливо виготовити сцинтилятори великих розмірів і заданої форми. Це дає змогу створювати сцинтиляційні детектори широкого призначення. В α -спектрометрії використання сцинтиляторів обмежено монокристалами CsI (Tl) (рисунк 2). Зазвичай застосовують тонкі монокристали для зменшення фону від β - і γ -випромінювань.

Дуже обмежені можливості в β -спектрометрії сцинтиляторів через сильне відбиття від поверхні сцинтиляторів електронів. Це характерно для неорганічних кристалів. Тому перевагу віддають органічним кристалам антрацена і стільбена. Деколи використовують рідкі сцинтилятори, зокрема для вимірювання спектра низькоенергетичних β -випромінювачів (^3H , ^{14}C , ^{35}S).



Рисунок 2 – Альфа спектрометр СЕА

Найбільш успішним виявилось використання сцинтиляторів у спектрометрії γ -випромінювання (рисунок 3). Найчастіше використовують кристал NaI (Tl) . З інших неорганічних сцинтиляторів використовують CsI (Tl) , найчастіше в спектрометрії рентгеновського та низькоенергетичного γ -випромінювання.



Рисунок 3 – Сцинтиляційний гамма-бета-спектрометр МКС-АТ1315

Рідкі сцинтилятори використовують при вимірюванні спектрів γ -випромінювання високих енергій, тому що на їх основі можна створити детектори великих розмірів. Сцинтиляційні спектрометри можуть вимірювати енергію, відносну інтенсивність і зовнішнє

випромінювання. Їм потрібно попереднє градування, оскільки вони є приладами для відносних вимірювань.

Іонізаційний метод [11, 12, 13, 14, 15] побудований на вимірюванні іонізаційного ефекту. Він виникає в чутливому об'ємі детектора при взаємодії з ним іонізуючого випромінювання. Використовують в основному три види іонізаційних детекторів: напівпровідниковий детектор, імпульсна іонізаційна камера з сіткою та пропорційний лічильник. Чутливий об'єм іонізаційної камери та пропорційного лічильника заповнюється робочим газом, який складається з інертного газу з додаванням багатоатомного газу – метану. У напівпровідниковому детекторі створюється чутлива область, в якій немає вільних носіїв заряду. Потрапляючи в цю область, заряджена частинка викликає іонізацію. Відповідно у валентній зоні з'являються дірки, а в зоні провідності – електрони. Під дією напруги, що прикладена до нанесеної на поверхню чутливої зони електродів, виникає рух дірок та електронів, що приводить до виникнення імпульсу струму. Прикладання напруги до напівпровідникового кристалу в кількості декількох кВ забезпечує збір усіх зарядів, утворених частинкою в обсязі детектора.

Кремнієві детектори і детектори з надчистого германію (HPGe) використовують для реєстрації заряджених частинок. Чутлива область кремнієвих детекторів товщиною до 5 мм відповідає пробігу протонів з енергією ~ 30 MeV та α -частинок з енергією ~ 120 MeV; для германію товщиною 5 мм – пробігу протонів і α -частинок з енергіями ~ 40 MeV і ~ 160 MeV відповідно. Германієві детектори можуть бути виготовлені з більш товстою чутливою областю.

Всім іонізаційним детекторам необхідно, щоб пробіг заряджених частинок повністю укладався в чутливій області. Тільки тоді існує прямий зв'язок між амплітудою вихідного сигналу і енергією частинки [16].

Це не поширюється на γ -детектори, оскільки взаємодія γ -випромінювання з речовиною чутливого об'єму цих детекторів здійснюється за допомогою ефекту утворення пар, фотоефекту та комптонівського ефекту.

Спектрометри з іонізаційними детекторами використовуються в α -, β - і γ -спектрометрії. Для вимірювання енергетичного розподілення α -випромінювання вико-

ристовують спектрометри з іонізаційними камерами.

Спектрометр з пропорційним лічильником застосовується як у β -спектрометрії, так і в спектрометрії рентгенівського та низькоенергетичного γ -випромінювання. Поверхнево-бар'єрні кремнієві детектори використовуються в основному в спектрометрії α -випромінювання.

Спектрометри з кремнієвими дифузійно-дрейфовими детекторами вимірюють β -спектри, а також спектри рентгенівського і низькоенергетичного γ -випромінювання. Германієві детектори дали змогу створити γ -спектрометри, що мають високі технічні параметри.

Найбільш широке практичне застосування з-поміж розглянутих спектрометрів отримали спектрометри зі сцинтиляційними і напівпровідниковими детекторами. Спектрометрія з напівпровідниковими детекторами має деякі переваги порівняно з іншими, а саме: невисокий рівень енергії, яка витрачається на створення пари електрон-дірка в кремнії та германії, – близько 3 eV; високі коефіцієнти поглинання (на декілька порядків вищі, ніж у газах; проте менші, ніж у сцинтиляторах NaI(Tl), CsI(Tl)), що дає можливість повністю поглинути енергію іонізуючої частинки в досить тонкому шарі; досить висока рухливість носіїв заряду, що дає змогу уникнути труднощів з реєстрацією частинок, які проникають на різні глибини в чутливу зону детектора; за розділенням напівпровідникові спектрометри кращі за сцинтиляційні спектрометри, це дає можливість одержати весь спектр одночасно і забезпечує вищу швидкість набору статистики та, відповідно, оперативність у роботі [17] (рисунок 4).



Рисунок 4 – Спектри напівпровідникового спектрометра

Результати досліджень. На рисунку 5 прямою лінією зображено еталонне значення радіонукліда, кривою – результати вимірювання активності радіонуклідів сцинтиляційним методом. Непевність результатів вимірювання становить 7,06 %, що є задовільним для цього методу. На рисунку 6 прямою лінією зображено еталонне значення радіонукліду, кривою – результати вимірювання активності радіонуклідів іонізаційним методом. Непевність результатів вимірювання становить 7,02 %, що також задовольняє вимогам точності.

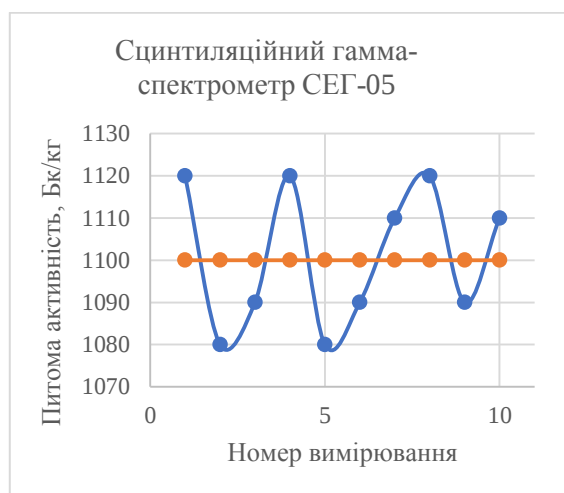


Рисунок 5 – Результати вимірювання активності радіонуклідів сцинтиляційним методом гамма-спектрометром СЕГ-05

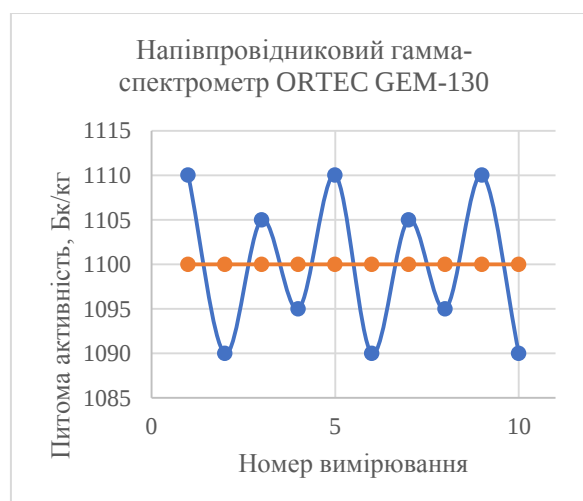


Рисунок 6 – Результати вимірювання активності радіонуклідів іонізаційним методом гамма-спектрометром ORTEC GEM-130

Обговорення результатів. В лабораторії було проведено калібрування об'ємного джерела іонізуючого випромінювання з радіонуклідом ^{137}Cs .

Непевність результатів вимірювання сцинтиляційним методом отримана в лабораторії за нормальних умов вимірювань (температура = 19 °C, вологість = 59 %, тиск = 99,4 кПа). Було проведено по 10 вимірювань для забезпечення коефіцієнта охопту 2. Отримано такі результати: невизначеність результатів вимірювань типу А – 0,48 %, невизначеність по типу В – 3,5 %, стандартна невизначеність – 3,53 %. Розширена невизначеність становила 7,06 %.

Непевність результатів вимірювання іонізаційним методом отримана в лабораторії за нормальних умов вимірювань (температура = 20 °C, вологість = 61 %, тиск = 99,8 кПа). Було проведено по 10 вимірювань для забезпечення коефіцієнта охопту 2. Отримано такі результати: невизначеність результатів вимірювань типу А – 0,25 %, невизначеність по типу В – 3,5 %, стандартна невизначеність – 3,51 %. Розширена невизначеність становила 7,02 %.

Отримані результати свідчать про те, що сцинтиляційний та іонізаційний методи вимірювання активності радіонуклідів найкраще підходять для застосування при калібруванні джерел іонізуючого випромінювання, оскільки непевність результатів вимірювань, проведених цими методами, є одного рівня та не перевищує 7,5 %, що відповідає заданим значенням [18, 19].

Висновок. Для напівпровідникового методу характерна висока розподільна здатність, а саме здатність приладу розділити дві близько розміщені на енергетичній шкалі групи моноенергетичного випромінювання одного роду. Фізичний зміст цього параметра – мінімальна різниця в енергіях ΔE двох моноенергетичних груп частинок або фотонів, які розрізняються по спектру, що дає можливість точніше визначати активність різних видів радіонуклідів у пробі. Це є перевагою цього методу при практичному застосуванні. Для сцинтиляційного методу характерна висока ефективність реєстрації, а саме відношення кількості частинок енергії, що зареєстровані в піці повного поглинання в одиницю часу, до зовнішнього випромінювання джерела, встановленого на заданій і фіксованій відстані від

детектора. Цей метод дає можливість точнішого визначення характеристики моноенергетичного піку окремого радіонукліду в пробі.

На основі дослідження визначено, що сцинтиляційний та іонізаційний методи вимірювання активності радіонуклідів мають точність, не більшу 10 %, що вказує на можливість їх застосування для методу подовження терміну експлуатації джерел на основі результатів їх калібрування.

Список використаних джерел

- [1] "Ионизирующее излучение, последствия для здоровья и защитные меры" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures>.
- [2] "Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text>.
- [3] "Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України" [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0552-05#Text>.
- [4] "Державні санітарні правила і норми "Гігієнічні вимоги до влаштування та експлуатації рентгенівських кабінетів і проведення рентгенологічних процедур". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1256-07#Text>.
- [5] ISO 12749-1: 2020 Ядерна енергія – Словник. Частина 1: Загальна термінологія.
- [6] Ю. И. Брегадзе, Э. К. Степанов, и В. П. Ярына, *Прикладная метрология ионизирующих излучений*. Москва, Россия: Энергоатомиздат, 1990.
- [7] А. Висмес, Р. Гурриаран, та Х. Кагнат, "Антикомптонівська гамма-спектрометрія для проб навколишнього середовища". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.radioprotection.org/articles/radiopro/pdf/2009/05/radiopro44113.pdf>.
- [8] ISO 19581: 2017 Вимірювання радіоактивності – Гамма-випромінюючі радіонукліди – Метод швидкого скринінгу з використанням сцинтиляційного детектора гамма-спектрометрії.

- [9] В. А. Грабовський, *Прикладна спекторметрія йонізуючих випромінювань*. Львів, Україна: Вид. центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2008.
- [10] А. И. Абрамов, Ю. А. Казанский, и Е. С. Матусевич, *Основы экспериментальных методов ядерной физики*. Москва, Россия: Атомиздат, 1970.
- [11] М. Ф. Юдин и др., *Измерение активности радионуклидов: справ. пособие*. Санкт-Петербург, Россия, 1997.
- [12] Н. Д. Бекетов, Е. И. Денисов, и В. Д. Пузако, *Элементы радиометрии и спектрометрии ионизирующих излучений*. Екатеринбург, Россия: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004.
- [13] С. Левчук, "Довідник по основних методах визначення активності радіонуклідів". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://uiar.org.ua/Dovidnyk.pdf>.
- [14] В. И. Бойко, и М. Е. Силаева, "Методы и приборы для измерения ядерных и других радиоактивных материалов". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://portal.tpu.ru/SHARED/g/GERINII/p osob/Tab3/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D1%8B%20%D0%B8%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B1%D0%BE%D1%80%D1%8B%20%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D1%8F%D0%B4%D0%B5.pdf>.
- [15] ДСТУ ISO 10703-2001 Захист від радіації. Визначення об'ємної активності радіонуклідів методом гамма-спектрометрії з високою розподільною здатністю (ISO 10703:1997, IDT). Вид. офіц. Київ, 2003.
- [16] BS EN ISO 18589-1:2021 Вимірювання радіоактивності в навколишньому середовищі. Ґрунт. Загальні вказівки та визначення.
- [17] П. Йодловски, та С. Ю. Калита, "Лабораторія гамма-спектрометрії для високоточних вимірювань концентрацій радіонуклідів у пробах доквілля". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BUJ7-0014-0024>.
- [18] ДСТУ ISO 7503-1-2001 Захист від радіації. Оцінювання забрудненості поверхні. Частина 1. Бета-випромінювачі (максимальна енергія бета-випромінювання понад 0,15 МеВ) та альфа-випромінювачі (ISO 7503-1:1988, IDT). Вид. офіц. Київ, 2003.
- [19] ДСТУ ISO 2919:2006 Захист від радіації. Джерела радіоактивні закриті. Загальні технічні вимоги та класифікація (ISO 2919:1999, IDT). Вид. офіц. Київ, 2012.

References

- [1] "Ionizing radiation, health effects and protective measures". [Online]. Available: <https://www.who.int/ru/news-room/factsheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures> [in Russian].
- [2] "Radiation safety standards of Ukraine (NRBU-97)". [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text> [in Ukrainian].
- [3] "Basic sanitary rules for ensuring radiation safety of Ukraine". [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0552-05#Text> [in Ukrainian].
- [4] "State sanitary rules and regulations" Hygienic requirements for the arrangement and operation of X-ray rooms and X-ray procedures". [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1256-07#Text> [in Ukrainian].
- [5] ISO 12749-1: 2020 Nuclear energy – Vocabulary. Part 1: General terminology [in Ukrainian].
- [6] Yu. I. Bregadze, E. K. Stepanov, and V. P. Yaryna, *Applied Metrology of Ionizing Radiation*. Moscow, Russia: Energoatomizdat, 1990 [in Russian].
- [7] A. de Vismes, R. Gurriaran, and H. Kagnat, "Anticompton gamma spectrometry for environmental samples". [Online]. Available: <https://www.radioprotection.org/articles/radiopro/pdf/2009/05/radiopro44113.pdf> [in Ukrainian].
- [8] ISO 19581: 2017 Measurement of radioactivity - Gamma emitting radionuclides - Rapid screening method using a gamma spectrometry scintillation detector [in Ukrainian].
- [9] V. A. Hrabovskyi, *Applied Spectrometry of Ionizing Radiation*. Lviv, Ukraine: Vyd. tsentr LNU im. Ivana Franka, 2008 [in Ukrainian].
- [10] A. I. Abramov, Yu. A. Kazanskiy, and Ye. S. Matusevich, *Fundamentals of Exper-*

- imental Methods of Nuclear Physics*. Moscow, Russia: Atomyzd, 1970 [in Russian].
- [11] M. F. Iudin et al., *Measurement of Activity of Radionuclides*: ref. manual. St. Petersburg, Russia, 1997 [in Russian].
- [12] N. D. Beketov, Ye. I. Denisov, and V. D. Puzako, *Elements of Radiometry and Spectrometry of Ionizing Radiation*. Yekaterinburg, Russia: GOU VPO UGTU-UIP, 2004 [in Russian].
- [13] S. Levchuk, "Handbook of basic methods for determining the activity of radionuclides". [Online]. Available: <http://uiar.org.ua/Dovidnyk.pdf> [in Ukrainian].
- [14] V. I. Boiko, and M. Ye. Silayeva, "Methods and instruments for measuring nuclear and other radioactive materials". [Online]. Available: <https://portal.tpu.ru/SHARED/g/GERINII/posob/Tab3/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D1%8B%20%D0%B8%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B1%D0%BE%D1%80%D1%8B%20%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D1%8F%D0%B4%D0%B5.pdf> [in Russian].
- [15] DSTU ISO 10703-2001 Radiation protection. Determination of the volumetric activity of radionuclides by high-resolution gamma spectrometry (ISO 10703: 1997, IDT). Official publication. Kyiv, 2003 [in Ukrainian].
- [16] BS EN ISO 18589-1:2021 Measurement of radioactivity in the environment. Soil. General guidelines and definitions [in Ukrainian].
- [17] P. Jodłowski, and S. Yu. Kalita, "Laboratory of gamma spectrometry for high-precision measurements of radionuclide concentrations in environmental samples". [Online]. Available: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BUJ7-0014-0024> [in Ukrainian].
- [18] DSTU ISO 7503-1-2001 Radiation protection. Assessment of surface contamination. Part 1. Beta emitters (maximum beta energy exceeding 0.15 MeV) and alpha emitters (ISO 7503-1: 1988, IDT). Official publication. Kyiv, 2003 [in Ukrainian].
- [19] DSTU ISO 2919:2006 Radiation protection. Closed radioactive sources. General technical requirements and classification (ISO 2919:1999, IDT). Official publication. Kyiv, 2012 [in Ukrainian].

R. V. Berestov¹, *postgraduate*,

e-mail: ruslan.v.berestov@lpnu.ua

¹SE "KYIVOBLSANDARTMETROLOGY",

January Breakthrough st., 84, Bila Tserkva, 09113, Ukraine

N. E. Hots², *Dr. Tech. Sc., Professor*,

Professor of the Department of Measuring Information Technologies,

e-mail: nataliia.y.hots@lpnu.ua

²National University "Lviv Polytechnic", S. Bandery st., 12, Lviv, 79013, Ukraine

RESEARCH OF METHODS OF MEASUREMENT OF RADIONUCLIDE ACTIVITY FOR CALIBRATION OF α -, β -, γ -RADIATION SOURCES

The article considers methods for measuring the activity of ionizing radiation sources. The normative documents that regulate the safety of the use of ionizing radiation sources are considered. Based on the analysis of the literature, a classification of methods for measuring the activity of radionuclides depending on the physical principle of radiation registration is formed. Methods for measuring the activity of radionuclides are considered. Analysis of methods for absolute measurements of nuclide activity shows that none of them is universal. Absolute measurement methods are used only in scientific research and in metrological practice. In all other cases, relative measurement methods are used. It is indicated that it is better to use relative methods to measure the activity of radionuclides. Measuring instruments that implement relative methods of measuring activity are easy to operate and have a low cost. Requirements for methods that can be used to measure the activity of ionizing radiation sources during their calibration are specified, namely the uncertainty of the measurement results does not exceed 10 % and the simplicity of their technical implementation. The analysis of literature sources on different methods is carried out. Scintillation and ionization methods and means of their implementation are considered in detail. The advantages of scintillation and ionization methods for

practical use for calibration of ionizing radiation sources and α -, β -, γ -radiation spectrometers are determined. The results of measuring the activity of radionuclides by scintillation method with gamma spectrometer SEG-05 and the results of measuring the activity of radionuclides by ionization method with gamma spectrometer ORTEC GEM-130 are shown in the graphs. The obtained results of measurements performed by these methods indicate that scintillation and ionization methods of measuring the activity of radionuclides are best suited for calibration of ionizing radiation sources, as the uncertainty of measurement results performed by these methods does not exceed 7.5 % and is the same level.

Keywords: *scintillation method, semiconductor method, spectrometer, detector, ionizing radiation.*

[0000-0001-5359-5974] **І. С. Кобиць¹,**[0000-0002-4605-814X] **О. О. Бруньов¹,**[0000-0003-1544-6040] **О. І. Андрієнко²,**[0000-0003-1498-7005] **С. О. Білокінь², канд. техн. наук,**[0000-0003-1281-1241] **С. В. Ротте², кандидат техн. наук, доцент**[0000-0002-5927-0326] **М. О. Бондаренко², д-р техн. наук, доцент**

e-mail: m.bondarenko@chdtu.edu.ua

¹Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний Центр МВС України
вул. Пастерівська, 104, м. Черкаси, 18009, Україна²Черкаський державний технологічний університет МОН України
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ МЕХАТРОННИХ ПРИСТРОЇВ МЕТОДОМ МУЛЬТИЗОНДОВОЇ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ

В роботі проводилося дослідження поверхонь елементів мехатронних пристроїв з метою визначення геометричних (стану, топології та морфології) та механічних (мікротвердості, зносостійкості та адгезійної міцності) характеристик функціональних поверхонь мехатронних пристроїв шляхом їх експериментального дослідження методом мультizonдової атомно-силової мікроскопії, що забезпечує необхідні рівні точності та надійності отриманих результатів. Вперше встановлено, що основною перевагою методу мультizonдової атомно-силової мікроскопії проти інших методів атомно-силової мікроскопії є здатність пришвидшеного дослідження нанорельєфу та механічних характеристик функціональних поверхонь виробів мехатроніки за один прохід досліджуваної ділянки. Отримані верифіковані альтернативними методами (інтерференційної мікроскопії, растрової електронної мікроскопії, мікротвердометрії за Вікерсом) результати дослідження показали високу якість, точність (похибка визначення механічних характеристик не перевищує 8 %), надійність (ймовірність отримання адекватних результатів, не менше 0,98) та оперативність (час проведення комплексу досліджень зменшено в 1,6...1,8 разів) визначення показників стану, геометричних та механічних характеристик функціональних поверхонь мехатронних пристроїв. Показано перспективи розвитку методу мультizonдової атомно-силової мікроскопії шляхом встановлення закономірностей впливу робочих параметрів та поверхневого стану зондів атомно-силового мікроскопа на точність, якість та оперативність процесу проведення дослідження.

Ключові слова: мультizonдова атомно-силова мікроскопія, мехатронний пристрій, функціональна поверхня, топологія поверхні, тонке покриття.

Постановка проблеми. Мехатронні пристрої різноманітного призначення та системи, побудовані на базі таких пристроїв, знаходять широке застосування в робототехніці, мікросхемотехніці, функціональному приладобудуванні, прецизійному машинобудуванні та інших галузях нової техніки [1]. Запровадження таких пристроїв та систем майже в усіх галузях сучасних техніки та технології обумовлено їх високою надійністю, функціональністю, технологічністю, адаптивністю у більшості технічних, інформаційних, біологічних середовищ тощо при відносно невисокій вартості [2]. Також конкурентною перевагою мехатронних пристроїв, порівнюючи з традиційними, є їх висока екологічність за малих ресурсо- й енерговитратах при їх

виготовленні й експлуатації, чим підтверджується перспектива розвитку галузі «мехатроніка» в рамках концепції сталого розвитку та ініціативи «Industry 4.0» [3].

Разом з тим висока популярність і подальше зростання обсягу виробництва мехатронних пристроїв (особливо в автомобілебудуванні та у виробництві засобів електронної та комп'ютерної техніки) вимагають удосконалення технологій виготовлення цих пристроїв і, відповідно, методів їх високоточного, оперативного, неруйнівного контролю. Ще однією проблемою, яка вимагає вирішення, є збільшення підробок та контрафактів мехатронних пристроїв [4, 5]. Таким чином, виникає необхідність в обов'язковій верифікації таких пристроїв, спрощення проведення якої можливе

шляхом дослідження характеристик функціональних поверхонь мехатронних пристроїв, які мають безпосередній вплив на їх техніко-експлуатаційні характеристики.

Серед сучасних методів дослідження поверхонь мехатронних пристроїв поширення набули методи скануючої зондової мікроскопії [6-9], а особливо, різновид цього методу – метод скануючої атомно-силової мікроскопії [10], який відрізняється високою точністю, роздільною здатністю та можливістю проводити оперативні дослідження більшості механічних та геометричних характеристик поверхні (а також приповерхневого шару) виробу в газовому та рідкому середовищі, а також у вакуумі [11, 12].

Проте збільшення обсягів виробництва мехатронних пристроїв вимагає збільшити швидкість проведення досліджень та навантаження на зонди вимірювального інструменту. Це, в свою чергу, призводить до зменшення точності та надійності проведених досліджень. Разом з тим збільшення кількості вимірювального обладнання несе додаткові фінансові витрати та веде до залучення додаткового персоналу, що обслуговуватиме таке обладнання. Тому питання пришвидшення проведення досліджень характеристик функціональних поверхонь мехатронних пристроїв методом атомно-силової мікроскопії із забезпеченням необхідних рівнів точності та надійності результатів таких досліджень є питанням актуальним.

Аналіз наявних досліджень. Питанням дослідження властивостей поверхонь елементів мехатроніки та мікросистемної техніки методами атомно-силової мікроскопії приділяється значна увага багатьма дослідниками (як вітчизняними, так і закордонними) [13-16], зокрема: визначення стану [16], мікрогеометрії поверхонь [16-18], а також їх механічних характеристик (мікротвердості, адгезійної міцності, зносостійкості тощо) [19-22]. У роботах [23-25] досліджено механізми силової та енергетичної взаємодії між вимірювальним інструментом та досліджуваною поверхнею, а в роботі [26] – моделі таких взаємодій. В усіх вищезазначених роботах [13-26] дослідження проводилися в контактному або безконтактному режимах із застосуванням спеціалізованих зондів [27-30].

У роботах [31, 32] пропонується використовувати комбіновану методику визначення геометричних та механічних характеристик твердих поверхонь. Особливістю методики є послідовне визначення стану поверхні, обран-

ня на цій поверхні досліджуваної зони та проведення точкового дослідження механічних характеристик у зазначеній зоні шляхом ідентифікації та страйбування по поверхні цієї зони зондом, модифікованим вуглецевим покриттям. Недоліком цієї методики є неможливість проведення досліджень механічних характеристик у кожній точці досліджуваної ділянки.

У дослідженні [33] пропонується проводити сканування зондом по чергово в контактному та безконтактному режимах на різних відстанях зонду від поверхні при високочастотних осциляціях останнього. Комбінація таких режимів роботи приладу дає змогу визначати не лише геометричні характеристики об'єкта дослідження, але й розподіл електростатичного або квазідинамічного електричного поля. В той же час точність та адекватність результатів дослідження обмежуються якістю підготовки досліджуваної поверхні, оскільки залишки органічних рідин та атмосферної вологи на поверхні зразків значно зменшують точність отримуваних результатів і призводять до помилкових результатів.

Для покращення точності та оперативності дослідження поверхонь зразків у роботі [34] пропонується використовувати мультизондовий інструментарій для атомно-силової мікроскопії. Як зазначається авторами цієї роботи, запропонований метод мультизондової атомно-силової мікроскопії (м-АСМ) дасть змогу дослідити широкий спектр властивостей матеріалів в одному циклі вимірювання.

Проте, за даними аналізу наукової літератури та інтернет-джерел, авторами зроблено висновок про відсутність відомостей щодо результатів експериментальних досліджень функціональних поверхонь мехатронних пристроїв методом м-АСМ.

Метою роботи є визначення геометричних та механічних характеристик функціональних поверхонь мехатронних пристроїв з підвищеною точністю, роздільною здатністю та оперативністю в результаті експериментальних досліджень таких поверхонь методом мультизондової атомно-силової мікроскопії.

Постановка завдань. Для досягнення цієї мети в роботі вирішувалися такі завдання:

- постановка методики та проведення дослідницького експерименту;
- отримання та обробка результатів експерименту;
- визначення адекватності отриманих результатів шляхом порівняння отриманих результатів експерименту.

Методологія дослідження. Основною перевагою запропонованого авторами методу м-АСМ, як зазначено в [35], порівняно з іншими методами АСМ, є здатність дослідження нанорельєфу та механічних характеристик функціональних поверхонь виробів мехатроніки за один прохід досліджуваної ділянки. В той же час, після зняття навантаження від дії зонда на ділянку, відбувається пружне відновлення поверхні, яке мінімізує її залишкове деформування.

Дослідження нанорельєфу і механічних характеристик функціональних поверхонь методом м-АСМ проводиться в кілька етапів у послідовностях, описаних в [36, 37]. На першому етапі відбувається підготовка до проведення експерименту за стандартною методикою початкового налаштування АСМ до процесу сканування [36]. Після попереднього налаштування приладу проводиться обрання ділянки проведення дослідження (максимально, для приладу NT-206 (ТДВ «Мікротестмашини») це ділянка 13×13 мкм) на поверхні досліджуваного зразка. Рекомендації, яких варто дотримуватися при обранні такої зони: область проведення досліджень не повинна мати значні перепади висот та западин (максимальна рекомендована розбіжність між найбільшою западиною та найбільшим виступом – не більша 3 мкм), включення іношродних матеріалів та органічних забруднень або

неорганічних мікрочастинок.

На наступному етапі проведення досліджень здійснюється сканування досліджуваної ділянки поверхні із наперед заданою швидкістю (швидкість обирається із досвіду оператора АСМ, виходячи із таких умов). Водночас треба врахувати той факт, що вища швидкість сканування дає змогу більш оперативно дослідити обрану ділянку, але за умови, що така ділянка має незначні поверхневі мікронерівності та на ній відсутні суттєві перепади рельєфу (наприклад, границі багатошарових конструкцій мікроросхемотехнічних компонентів). На протидію цьому, дослідження ділянки зі складним рельєфом з достатньою точністю та адекватністю результатів вимірювання варто проводити на менших швидкостях сканування. Також для отримання об'єктивної інформації про загальний стан та властивості більшої ділянки поверхні (аж до 10×10 мм) треба провести серію досліджень (не менше 3...5 вимірювань з паузою у 2...3 хв на 9 ділянках поверхні) [37].

На останньому етапі дослідження проводяться завершальні дії щодо вимкнення дослідницького обладнання та збереження отримуваних даних [36].

Загальну блок-схему проведення дослідження функціональних поверхонь мехатронних пристроїв методом м-АСМ зображено на рисунку 1.

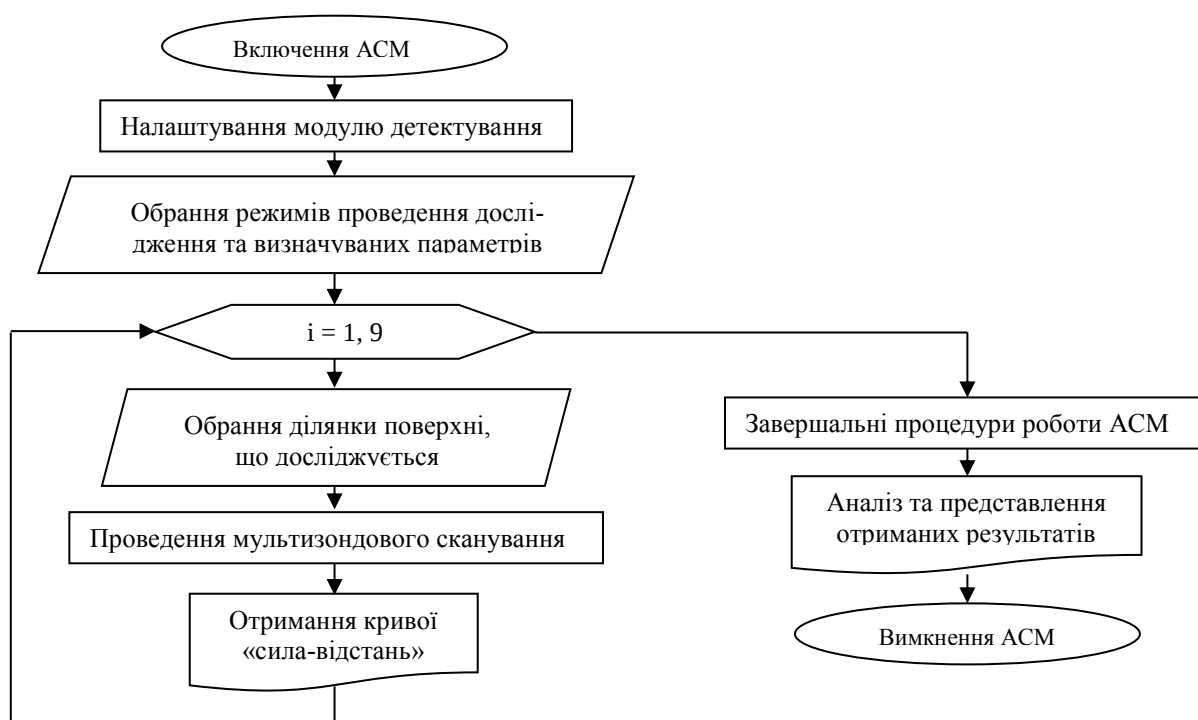
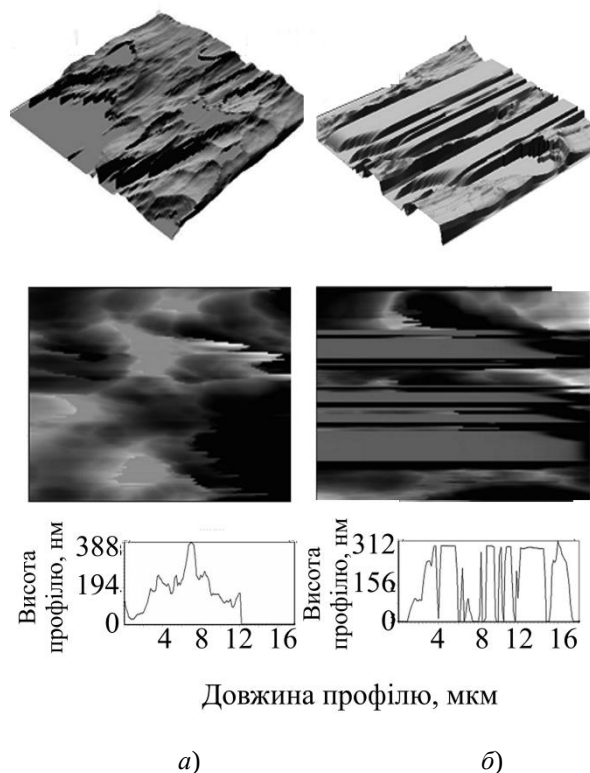


Рисунок 1 – Блок-схема дослідження функціональних поверхонь мехатронних пристроїв методом мультizonдової атомно-силової мікроскопії

Результати досліджень та їх обговорення. Усі експериментальні дослідження проводилися методом м-АСМ, а підтвердження їх результатів проводилося порівнянням з даними, отриманими за однакових умов проведення дослідження на тих самих зразках із застосуванням базового методу АСМ за методиками, описаними в роботах [7, 36, 37]. Далі наводяться результати досліджень та порівнянь стану і мікрогеометрії поверхні та її основних механічних характеристик.

Дослідження стану та мікрогеометрії поверхні. Стан поверхні та її мікрогеометрія досліджувалися на дослідних зразках, як такі застосовувалися статори (п'єзокераміка марки ЦТС-19) п'єзодвигуна РМ-20R [38] мехатронного мікроманіпулятора. Так, результати діагностування поверхневих артефактів такого зразка наведені на рисунку 2.



**Рисунок 2 – Діагностування поверхневих артефактів на ділянці поверхні (13×13 мкм) статора п'єзодвигуна РМ-20R (виробник: ТОВ «Лілея», Україна) методами м-АСМ (а) та за базовими методиками методу АСМ (б).
Зображення згори-донизу: тривимірне зображення досліджуваної ділянки поверхні; топограма поверхні; профіль поверхні ділянки**

Діагностування проводилося за допомогою запропонованого авторами методу мультизондової АСМ (рисунок 2, а) та базового методу АСМ (рисунок 2, б) за раціональних умов проведення експерименту. Ділянки поверхні елементів з п'єзоелектричної кераміки ЦТС-19 (статора – біморфної прямокутної пластини 6×1,8×0,25 мм), що діагностувалися за допомогою запропонованого авторами методу мультизондової АСМ (рисунок 2, а), показали більш контрастну поверхню з артефактами, розміри яких не відображалися на АСМ-зображеннях, отриманих за допомогою базового методу АСМ (рисунок 2, б). Так, на тривимірних зображеннях і топограмах досліджуваної ділянки поверхні (рисунок 2, а, б) показано, що АСМ-зображення поверхні мають «зрізані» ділянки, викликані скануванням кремнієвим зондом досліджуваної поверхні з кроком, що значно перевищував крок сканування у випадку методу м-АСМ (крок сканування – 100 нм для АСМ і 34 нм для м-АСМ). Такі ділянки спостерігаються і на профілограмі поверхні (рисунок 2, б) як вертикальні та горизонтальні відрізки на ділянках кривої профілю. Для методу м-АСМ (рисунок 2, а) кількість таких ділянок була меншою у 12...18 разів. Водночас варто зазначити, що час діагностування поверхні базовим методом АСМ становив близько 130...150 с, тоді як методом м-АСМ цей час не перевищував 80 с.

Під час проведення експерименту із залученням інструменту профілометрії АСМ-зображень також аналізувався розподіл нерівностей рельєфу поверхні на досліджуваних ділянках (рисунок 3).

У ході досліджень розподілу мікронерівностей по поверхні авторами встановлено, що при застосуванні методу м-АСМ спостерігалася більша однорідність поверхні та рівномірність розподілу по ній мікронерівностей, що повністю підтверджувалося в процесі верифікації отриманих результатів (рисунок 3) із залученням методу інтерференційної мікроскопії на повіреному приладі «МІІ-4М» (діапазон вимірювань – 0,1...0,8 мкм; абсолютна точність вимірювань – 5...20 нм) [39]. З використанням такого приладу визначені середні значення шорсткості цих поверхонь в діапазоні 18...27 нм. Розбіжність значень товщини, визначеної за вищезазначеною методикою, та значень, отриманих інтерференційною мікроскопією, становила 1,8...4,3 %.

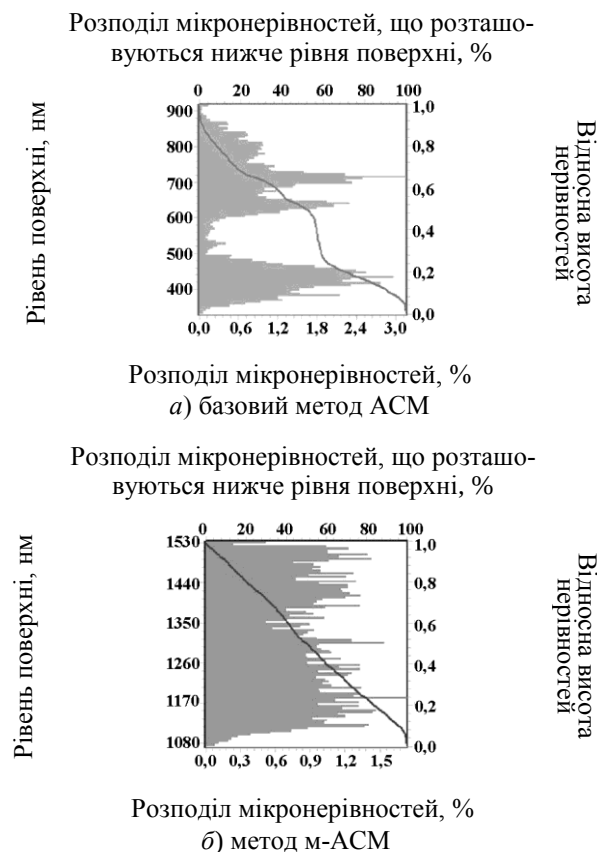


Рисунок 3 – Гістограми розподілу мікронерівностей по поверхні досліджуваних ділянок

Таким чином, дослідження стану та мікрогеометрії поверхні (наявність артефактів поверхні, її мікрорельєф та розподіл нерівностей) із залученням розробленого методу мультизондової АСМ дає змогу підвищити у 2,9 рази роздільну здатність визначення артефактів на поверхні елементів мехатронних пристроїв, визначати з високою точністю (відносна похибка не перевищувала 4,5 %) та якістю її нанорельєф, а також скоротити час проведення дослідження зі 130...150 с до 80 с.

Дослідження та аналіз морфології поверхні. Як і у випадку дослідження стану поверхні, як експериментальні зразки обиралися пластини з п'єзокераміки ЦТС-19, проте, які знаходилися в експлуатації протягом 15 років.

Аналіз морфології поверхні таких пластин (рисунок 4) дав можливість визначити морфологію поверхні, яка здавалася більш однорідною при її дослідженні методом базової АСМ, тоді як дослідження, проведені методом м-АСМ, показали менш однорідну морфологію поверхні (рисунок 4, б).

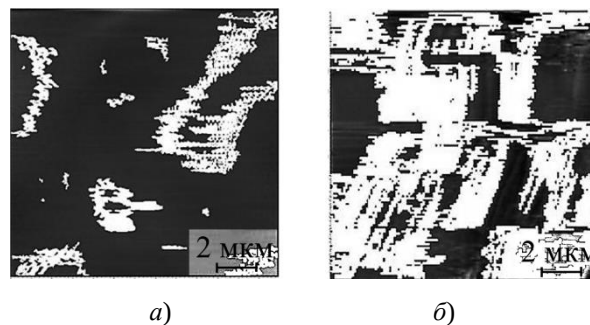


Рисунок 4 – Морфологія поверхні пластини з ЦТС-19, що визначалася методом базової АСМ (а) та мультизондової АСМ (б)

Результати дослідження морфології поверхні підтверджувалися методом растрової електронної мікроскопії та встановили відповідність отриманої морфології поверхні результатам, отриманим м-АСМ (розбіжність між результатами виявлення морфології поверхні цими методами не перевищила 13...16 %).

Дослідження механічних характеристик компонентів мехатронної техніки. Визначення механічних характеристик (мікротвердості, зносостійкості, а також адгезійної міцності тонких покриттів) компонентів мехатронної техніки здійснюється за розробленими в роботах [36, 37] методиками.

Дослідження мікротвердості запропонованим методом м-АСМ (на прикладі кремнієвого мікроактуатора пристрою позиціонування) і його аналіз наведено на рисунку 5 [34].

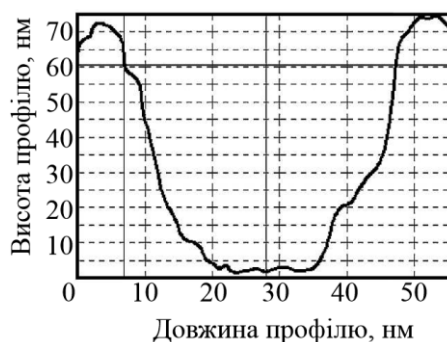


Рисунок 5 – Профіль відбитка зонда-наноіндентора в місці провадження останнього в режимі наноідентування ділянки поверхні кремнієвої пластини (ділянка 70×70 nm)

Досліджено, що методом м-АСМ можна з високою точністю (похибка не перевищувала 8 %) визначати мікротвердість матеріалів в діапазоні значень 140 МПа–44 ГПа, що суттєво перевищує діапазон значень мікротвердості

477 МПа–11 ГПа при визначенні цієї поверхні базовим методом АСМ.

Дослідження зносостійкості поверхні проводилося методом склерометрії за такого навантаження на зонд, як $4 \dots 10 \cdot 10^{-4}$ Н [37]. В результаті дослідження отримано треки (рис. 6) від дії зонда-індентора на досліджувану поверхню. Для випадку дослідження зносостійкості методом мультизондової АСМ було отримано безперервні треки однакової інтенсивності, що доводить адекватність і високу точність визначення коефіцієнта зносостійкості, що мав високу збіжність з табличними даними (кореляція між цими даними становила не менше 87 %).

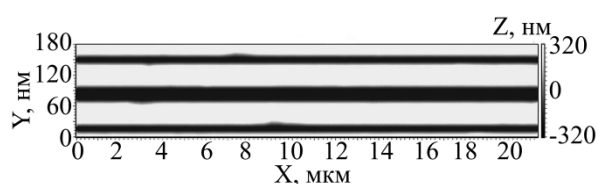


Рисунок 6 – АСМ-трек склерометричного вимірювання на зносостійкість кремнієвої пластини

Проте, оскільки коефіцієнт зносостійкості виражається в умовних одиницях (відносно значення зносостійкості для алмазу у 100 у.о.), можна вважати точність розрахункових значень проти табличних значень достатньою, а отримані за допомогою методу м-АСМ результати такими, що відповідають дійсності.

Ще однією механічною характеристикою елементів мехатронних пристроїв, що підлягала визначенню методом м-АСМ, є адгезійна міцність зчеплення покриття з основою таких елементів. Як елементи мехатронних пристроїв досліджувалися зразки мікродзеркал (16×16 мкм) оптичної системи DMD-матриці для проектування зображення «Асер С120», що являють собою пластини розмірами 8×14 мм із оптичного скла К8 з нанесеним на нього тонким шаром (товщина – 9 нм) покриття Al_2O_3 . Проведений аналіз отриманих профілів [40] при дослідженні цих зразків (рис. 7) дає змогу провести як кількісну оцінку адгезійної міцності покриття, так і її зміну зі збільшенням товщини покриття.

Проведені дослідження адгезійної міцності тонких покриттів на оптичному склі методом м-АСМ вперше дали можливість встановити адгезійну міцність функціональних

покриттів, яка зменшується за експоненціальним законом.

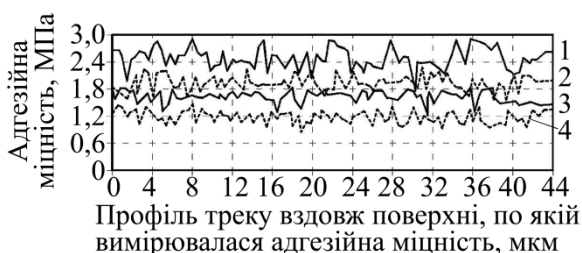


Рисунок 7 – Розподіл адгезійної міцності по пластині з оптичного скла

(покриття Al_2O_3 товщиною 10 нм)

по глибині проникнення зонда-індентора:

1 – $h = 0$ (поверхня покриття); 2 – $h = 3$ нм;
3 – $h = 6$ нм; 4 – $h = 10$ нм (межа між скляною пластинкою та оксидним покриттям)

Висновки. Таким чином, проведені дослідження та порівняння одержаних запропонованим авторами методом мультизондової АСМ результатів з результатами, отриманими базовим методом АСМ та верифікованими альтернативними методами (інтерференційної мікроскопії, растрової електронної мікроскопії, мікротвердометрії за Вікерсом), показали високу якість, точність (похибка визначення механічних характеристик не перевищує 8 %), надійність (ймовірність отримання адекватних результатів – не менша 0,98) та оперативність (час проведення комплексу досліджень зменшено в 1,6...1,8 разу) визначення показників стану, геометричних та механічних характеристик функціональних поверхонь мехатронних пристроїв.

Як наукову новизну результатів досліджень, що проводилися в роботі, варто зазначити таке: вперше встановлено, що використання розробленого методу мультизондової АСМ, на відміну від традиційного методу однозондової АСМ, дає можливість:

- підвищити у 2,9 разу роздільну здатність визначення артефактів на поверхні елементів мехатронних пристроїв, визначати з високою точністю (відносна похибка не перевищувала 4,5 %) та якістю її нанорельєф, а також скоротити час проведення дослідження зі 130...150 с до 80 с;

- отримувати морфологію поверхні на рівні якості, що відповідає методу РЕМ (розбіжність між результатами виявлення морфології поверхні цими методами не перевищила 13...16 %);

– визначати з високою точністю (похибка не перевищувала 8 %) мікротвердість матеріалів у діапазоні значень 140 МПа–44 ГПа; коефіцієнт зносостійкості, що має високу збіжність з табличними даними (кореляція між цими даними становила не менше 87 %), а також кількісну оцінку та зміну значення адгезійної міцності функціонального покриття на поверхнях мехатронних пристроїв.

Практична значимість можливостей методу мультизондової атомно-силової мікроскопії полягає в експериментально підтверджених результатах, проведених з використанням цього методу досліджень, що підтверджують високу точність (відносна похибка не перевищувала 4,5 % для визначення мікрогеометричних параметрів поверхні та не перевищувала 8 % для визначення мікромеханічних параметрів поверхні) та оперативність (швидкість проведення дослідження підвищено, мінімум, в 1,6 разу) методу.

У подальших дослідженнях планується дослідити робочі параметри та стан зондів мультизондового інструменту на точність, якість та оперативність процесу проведення дослідження методом м-АСМ.

Подяка. Дослідження проводилися в рамках проекту, що виконується з власної ініціативи за кошти виконавця НДР: «Комп'ютеризована система діагностування та контролю параметрів компонентів мікросистемної техніки методом атомно-силової мікроскопії» (Державний реєстраційний номер: 0121U113777, 12.2021 – 12.2022 pp.).

Список використаних джерел

- [1] R. Sharma, and B. Dhiman, "Mechatronics around the world - at a glance", *Journal of Mechatronics and Robotics*, no. 5 (1), pp. 1-7, 2021.
doi: 10.3844/jmrsp.2021.1.7.
- [2] D. Alciatore, *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems*, 5th ed., USA, McGraw-Hill Higher Education, 2018.
- [3] O. Kushnirenko, N. Gakhovich, and L. Venger, "The impact of industry 4.0 technologies on structural transformation in the manufacturing", in *IV Int. Sci. Congress Society of Ambient Intelligence – 2021 (ISCSAI 2021)*, vol. 100, iss. 01009, 2021.
doi: 10.1051/shsconf/202110001009.
- [4] K. Deng, Z. Yu, S. Patnaik, and J. Wang, "Advances in intelligent systems and computing: recent developments in mechatronics and intelligent robotics", in *Proc. Int. Conf. on Mechatronics and Intelligent Robotics (ICMIR 2018)*, Springer Nature, Switzerland AG, 2019, p. 454.
doi: 10.1007/978-3-030-00214-5.
- [5] D. Brandl, "Serialization, where automation and IT collide", *Control Engineering*, 2014. [Online]. Available: <https://www.controleng.com/articles/serialization-where-automation-and-it-collide/>.
- [6] В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, Ю. Ю. Бондаренко, П. В. Петльований, С. О. Білокінь, та М. О. Бондаренко, *Методи та засоби мікроскопії*. Київ, Україна: НТУУ "КПІ", 2013.
- [7] В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, О. В. Верцанова, Ю. Ю. Бондаренко, С. О. Білокінь, та М. О. Бондаренко, *Мікроскопія в нанотехнологіях*. Київ, Україна: НТУУ "КПІ", 2014.
- [8] F. Giessibl, "Advances in atomic force microscopy", *Reviews of Modern Physics*, vol. 75, iss. 3, pp. 949-983, 2003.
- [9] E. Meyer, R. Bennewitz, and H. J. Hug, *Scanning Probe Microscopy. The Lab on a Tip. Graduate Texts in Physics*, 2nd ed., 2021.
doi: 10.1007/978-3-030-37089-3.
- [10] W. R. Bowen, and N. Hilal, *Atomic Force Microscopy in Process Engineering: Introduction to AFM for Improved Processes and Products*, Butterworth-Heinemann, 2009.
doi: 10.1016/C2009-0-18509-4.
- [11] G. Haugstad, *Atomic Force Microscopy: Understanding Basic Modes and Advanced Applications*, UK, Wiley, 2012.
- [12] S. Morita, F. J. Giessibl, E. M. Roland Wiesendanger, *Noncontact atomic force microscopy*, vol. 3. Springer, Cham, 2015.
doi: 10.1007/978-3-319-15588-3.
- [13] M. A. Lantz, S. J. O'Shea, and M. E. Welland, "Characterization of tips for conducting atomic force microscopy in ultrahigh vacuum", *Review of scientific instruments*, vol. 69, no. 4, pp. 1757-1764, 1998.
- [14] L. Hongwei et al., "Nanoscale infrared, thermal and mechanical properties of aged microplastics revealed by an atomic force microscopy coupled with infrared spectroscopy (AFM-IR) technique", *Science of the Total Environment*, no. 744, p. 140944, 2020.

- [15] A. Chlanda, E. Kijeńska-Gawrońska, J. Zdunek, and W. Swieszkowski, "Internal nanocrystalline structure and stiffness alterations of electrospun polycaprolactone-based mats after six months of in vitro degradation. An atomic force microscopy assay", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, no. 101, p. 103437, 2020.
- [16] X. Li, M. Dong, D. Jiang, S. Li, and Y. Shang, "The effect of surface roughness on normal restitution coefficient, adhesion force and friction coefficient of the particle-wall collision", *Powder Technology*, no. 362, pp. 17-25, 2020.
- [17] В. В. Семенець, І. Ш. Невлюдов, та В. А. Палагін, *Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології*. Харків, Україна: ХНУРЕ, 2012.
- [18] Д. М. Фреїк, І. В. Горічок, Я. С. Яворський, Б. С. Дзундза, та Ю. В. Кланічка, "Процеси формування і топологія тонких плівок і наноструктур срібла (огляд)", *Фізика і хімія твердого тіла*, т. 12, № 3, с. 555-566, 2011.
- [19] O. Andriienko, S. Bilokin, and M. Bondarenko, "Features of creation of multiprobe system for nanometric measurements of geometrical and mechanical properties of surfaces of microsystem devices", *Machines. Technologies. Materials*, vol. 14, iss. 6, pp. 268-271, 2020. [Online]. Available: <https://stumejournals.com/mtm.htm>.
- [20] *Nanomechanics, Inc. Nanomechanics: In-SEM Nanoindentation and iNano Nanoindenter*. Oak Ridge, TN, USA: Nanomechanics, Inc. Retrieved, Jun. 28, 2017.
- [21] W. C. Oliver, and G. M. Pharr, "Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology", *Journal of Materials Research*, vol. 19, iss. 1, pp. 3-20, 2004.
- [22] M. Bondarenko, V. Antonyuk, I. Bondarenko, I. Makarenko, and S. Vysloukh, "Improving the accuracy of microhardness measurement of nanoelectronic elements by the silicic probes of atomic-force microscopy, that is modified by carbon coverage", in *New Technologies, Development and Application IV (NT-2021): Lecture Notes in Networks and Systems*, I. Karabegović, Ed., vol. 233. Springer, Cham, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-75275-0_3.
- [23] P. M. Williams et al., "Blind reconstruction of scanning probe image data", *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 14, iss. 2, pp. 1557-1562, 2004.
- [24] R. R. L. De Oliveira et al., *Atomic Force Microscopy – Imaging, Measuring and Manipulating Surfaces at the Atomic Scale*. Rijeka, Croatia: InTech, 2012.
- [25] D. Sarid, *Scanning Force Microscopy with Applications to Electric, Magnetic and Atomic Forces*. New York, NY, USA: Oxford Univ. Press, 1991.
- [26] A. Lytra, V. Sboros, A. Giannakopoulos, and N. Pelekasis, "Modeling atomic force microscopy and shell mechanical properties estimation of coated microbubbles", *Soft Matter*, vol. 16, iss. 19, 2020. doi: 10.1039/D0SM00300J.
- [27] V. V. Medianyuk, Yu. Yu. Bondarenko, C. V. Bazilo, and M. O. Bondarenko, "Research of current-conducting electrodes of elements from piezoelectric ceramics modified by the low-energy ribbon-shaped electron stream", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 10, no. 6, pp. 06012-1–06012-6, Sumy State University, 2018. doi: 10.21272/jnep.10(6).06012.
- [28] A. Boisen, O. Hansen, and S. Bouwstra, "AFM probes with directly fabricated tips", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 6, iss. 1, pp. 58-62, 1996. doi: 10.1088/0960-1317/6/1/012.
- [29] Т. П. Каминская, "Атомно-силовая микроскопия для электроники", *Производство электроники*, № 6, с. 37-39, 2010.
- [30] V. Titarenko, S. Bilokin, M. Bondarenko, Yu. Bondarenko, and V. Antonyuk, "Destruction of silicone probes of the atomic force microscope caused by the electrostatic breakdown during scanning of dielectric surfaces", *Innovations*, vol. VI, iss. 2, pp. 72-74, 2018.
- [31] V. S. Antonyuk, Yu. Yu. Bondarenko, S. O. Bilokin, V. O. Andrienko, and M. O. Bondarenko, "Research of microhardness of thin ceramic coatings formed by combined electron-beam method on dielectric materials", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 11, no. 6, pp. 06024-1–06024-5, Sumy State University, 2019. doi: 10.21272/jnep.11(6).06024.
- [32] "Многофункциональный сканирующий зондовый микроскоп (атомно-силовой микроскоп)", 2016. [Электронный ре-

- сурс]. Режим доступа: <http://microtm.com/nt206/nt206r.htm>. Дата обращения: Май 12, 2016.
- [33] В. А. Мошников, Ю. М. Спивак, П. А. Алексеев, и Н. В. Пермяков, *Атомно-силовая микроскопия для исследования нано-структурированных материалов и приборных структур*. Санкт-Петербург, Россия: ЛЭТИ, 2014. ISBN 978-5-7629-1471-0.
- [34] O. Andriienko, S. Bilokin, and M. Bondarenko, "Features of creation of multiprobe system for nanometric measurements of geometrical and mechanical properties of surfaces of microsystem devices", in *Proc. XVII Int. Sci. Congress Machines. Technologies. Materials*, (Varna, Sept. 09-12, 2020). Varna, Bulgaria, 2020, vol. 2 (17), pp. 50-53. [Online]. Available: <http://mtmcongress.com/winter/sbornik/2-2020.pdf>.
- [35] A. Suslov, M. Bondarenko, and O. Andrienko, "Perspectives of development of multi-instrumental atomic-force microscopy under nanometric researches of components of microsystem equipment", на VII Міжнар. наук.-техн. конф. Датчики, прилади та системи – 2018, (с. Лазурне, Верес. 17-21, 2018 р.). Черкаси, 2018, с. 80-82.
- [36] С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, та В. С. Антонюк, "Дослідження фізичних характеристик діелектричних поверхонь за допомогою діагностичного стенда на базі атомно-силового мікроскопа", *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*: наук. зб., № 2 (78), с. 176-181, 2015.
- [37] М. О. Бондаренко, "Дослідження механічних характеристик елементів приладів точного приладобудування методом атомно-силової мікроскопії", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 2, с. 21-28, 2015.
- [38] С. Ф. Петренко, *Електричні мікромашини*. Київ, Україна: Корнійчук, 2002.
- [39] Г. М. Дубровская, Ю. И. Коваленко, Г. В. Канашевич, и М. А. Бондаренко, "Изучение поверхности наноструктурных покрытий нитрида и карбонитрида титана, полученных газофазным осаждением и ионно-лучевой обработкой", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, № 2, с. 56-60, 2006.
- [40] С. А. Білоконь, М. А. Бондаренко, и Ю. Ю. Бондаренко, "Определение адгезионной прочности тонких оксидных покрытий на диэлектрических материалах методом атомно-силовой микроскопии", *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнології*, т. 12, № 2, с. 295-302, 2014.

References

- [1] R. Sharma, and B. Dhiman, "Mechatronics around the world - at a glance", *Journal of Mechatronics and Robotics*, no. 5 (1), pp. 1-7, 2021. doi: <https://doi.org/10.3844/jmrsp.2021.1.7>.
- [2] D. Alciatore, *Introduction to Mechatronics and Measurement Systems*, 5th ed., USA, McGraw-Hill Higher Education, 2018.
- [3] O. Kushnirenko, N. Gakhovich, and L. Venger, "The impact of industry 4.0 technologies on structural transformation in the manufacturing", in *IV Int. Sci. Congress Society of Ambient Intelligence – 2021 (ISCSAI 2021)*, vol. 100, iss. 01009, 2021. doi: 10.1051/shsconf/202110001009.
- [4] K. Deng, Z. Yu, S. Patnaik, and J. Wang, "Advances in intelligent systems and computing: recent developments in mechatronics and intelligent robotics", in *Proc. Int. Conf. on Mechatronics and Intelligent Robotics (ICMIR 2018)*, Springer Nature, Switzerland AG, 2019, p. 454. doi: 10.1007/978-3-030-00214-5.
- [5] D. Brandl, "Serialization, where automation and IT collide", *Control Engineering*, 2014. [Online]. Available: <https://www.controleng.com/articles/serialization-where-automation-and-it-collide/>.
- [6] V. S. Antoniuk, H. S. Tymchyk, Yu. Yu. Bondarenko, P. V. Petlovanyi, S. O. Bilokin, and M. O. Bondarenko, *Methods and means of microscopy*. Kyiv, Ukraine: NTUU "KPI", 2013 [in Ukrainian].
- [7] V. S. Antoniuk, H. S. Tymchyk, O. V. Vertsanova, Yu. Yu. Bondarenko, S. O. Bilokin, and M. O. Bondarenko, *Microscopy in nanotechnology*. Kyiv, Ukraine: NTUU "KPI", 2014 [in Ukrainian].
- [8] F. Giessibl, "Advances in atomic force microscopy", *Reviews of Modern Physics*, vol. 75, iss. 3. pp. 949-983, 2003.

- [9] E. Meyer, R. Bennewitz, and H. J. Hug, *Scanning Probe Microscopy. The Lab on a Tip. Graduate Texts in Physics*, 2nd ed., 2021.
doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-37089-3>.
- [10] W. R. Bowen, and N. Hilal, *Atomic Force Microscopy in Process Engineering: Introduction to AFM for Improved Processes and Products*, Butterworth-Heinemann, 2009.
doi: 10.1016/C2009-0-18509-4.
- [11] G. Haugstad, *Atomic Force Microscopy: Understanding Basic Modes and Advanced Applications*, UK, Wiley, 2012.
- [12] S. Morita, F. J. Giessibl, E. M. Roland Wiesendanger, *Noncontact atomic force microscopy*, vol. 3. Springer, Cham, 2015.
doi: 10.1007/978-3-319-15588-3.
- [13] M. A. Lantz, S. J. O'Shea, and M. E. Welland, "Characterization of tips for conducting atomic force microscopy in ultrahigh vacuum", *Review of scientific instruments*, vol. 69, no. 4, pp. 1757-1764, 1998.
- [14] L. Hongwei et al., "Nanoscale infrared, thermal and mechanical properties of aged microplastics revealed by an atomic force microscopy coupled with infrared spectroscopy (AFM-IR) technique", *Science of the Total Environment*, no. 744, p. 140944, 2020.
- [15] A. Chlanda, E. Kijeńska-Gawrońska, J. Zdunek, and W. Swieszkowski, "Internal nanocrystalline structure and stiffness alterations of electrospun polycaprolactone-based mats after six months of in vitro degradation. An atomic force microscopy assay", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, no. 101, p. 103437, 2020.
- [16] X. Li, M. Dong, D. Jiang, S. Li, and Y. Shang, "The effect of surface roughness on normal restitution coefficient, adhesion force and friction coefficient of the particle-wall collision", *Powder Technology*, no. 362, pp. 17-25, 2020.
- [17] V. V. Semenets, I. Sh. Nevliudov, and V. A. Palahin, *Introduction to microsystem technology and nanotechnology*. Kharkiv, Ukraine: KhNURE, 2012 [in Ukrainian].
- [18] D. M. Freik, I. V. Horichok, Ya. S. Iavorskyi, B. S. Dzundza, and Yu. V. Klanichka, "Processes of formation and topology of thin films and nanostructures of silver (review)", *Fizyka i khimiia tverdoho tila*, vol. 12, no. 3, pp. 555-566, 2011 [in Ukrainian].
- [19] O. Andriienko, S. Bilokin, and M. Bondarenko, "Features of creation of multiprobe system for nanometric measurements of geometrical and mechanical properties of surfaces of microsystem devices", *Machines. Technologies. Materials*, vol. 14, iss. 6, pp. 268-271, 2020. [Online]. Available: <https://stumejournals.com/mtm.htm>.
- [20] Nanomechanics, Inc. *Nanomechanics: In-SEM Nanoindentation and iNano Nanoindenter*. Oak Ridge, TN, USA: Nanomechanics, Inc. Retrieved, Jun. 28, 2017.
- [21] W. C. Oliver, and G. M. Pharr, "Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology", *Journal of Materials Research*, vol. 19, iss. 1, pp. 3-20, 2004.
- [22] M. Bondarenko, V. Antonyuk, I. Bondarenko, I. Makarenko, and S. Vysloukh, "Improving the accuracy of microhardness measurement of nanoelectronic elements by the silicic probes of atomic-force microscopy, that is modified by carbon coverage", in *New Technologies, Development and Application IV (NT-2021): Lecture Notes in Networks and Systems*, I. Karabegović, Ed., vol. 233. Springer, Cham, 2021.
doi: 10.1007/978-3-030-75275-0_3.
- [23] P. M. Williams et al., "Blind reconstruction of scanning probe image data", *J. Vac. Sci. Technol. B.*, vol. 14, iss. 2, pp. 1557-1562, 2004.
- [24] R. R. L. De Oliveira et al., *Atomic Force Microscopy – Imaging, Measuring and Manipulating Surfaces at the Atomic Scale*. Rijeka, Croatia: InTech, 2012.
- [25] D. Sarid, *Scanning Force Microscopy with Applications to Electric, Magnetic and Atomic Forces*. New York, NY, USA: Oxford Univ. Press, 1991.
- [26] A. Lytra, V. Sboros, A. Giannakopoulos, and N. Pelekasis, "Modeling atomic force microscopy and shell mechanical properties estimation of coated microbubbles", *Soft Matter*, vol. 16, iss. 19, 2020.
doi: 10.1039/D0SM00300J.
- [27] V. V. Medianyuk, Yu. Yu. Bondarenko, C. V. Bazilo, and M. O. Bondarenko, "Research of current-conducting electrodes of elements from piezoelectric ceramics modified by the low-energy ribbon-shaped electron stream", *Journal of Nano- and Elec-*

- tronic Physics*, vol. 10, no. 6, pp. 06012-1–06012-6, Sumy State University, 2018.
doi: 10.21272/jnep.10(6).06012.
- [28] A. Boisen, O. Hansen, and S. Bouwstra, "AFM probes with directly fabricated tips", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 6, iss. 1, pp. 58-62, 1996.
doi: 10.1088/0960-1317/6/1/012.
- [29] T. P. Kaminskaya, "Atomic force microscopy for electronics", *Proizvodstvo elektroniki*, no. 6, pp. 37-39, 2010 [in Russian].
- [30] V. Titarenko, S. Bilokin, M. Bondarenko, Yu. Bondarenko, and V. Antonyuk, "Destruction of silicone probes of the atomic force microscope caused by the electrostatic breakdown during scanning of dielectric surfaces", *Innovations*, vol. VI, iss. 2, pp. 72-74, 2018.
- [31] V. S. Antonyuk, Yu. Yu. Bondarenko, S. O. Bilokin, V. O. Andrienko, and M. O. Bondarenko, "Research of microhardness of thin ceramic coatings formed by combined electron-beam method on dielectric materials", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 11, no. 6, pp. 06024-1–06024-5, Sumy State University, 2019.
doi: 10.21272/jnep.11(6).06024.
- [32] "Multifunctional scanning probe microscope (atomic force microscope)", 2016. [Online]. Available: <http://microtm.com/nt206/nt206r.htm>. Accessed on: May 12, 2016 [in Russian].
- [33] V. A. Moshnikov, Yu. M. Spivak, P. A. Alekseev, and N. V. Permyakov, *Atomic force microscopy for the study of nanostructured materials and instrument structures*. St. Petersburg, Russia: LETI, 2014. ISBN 978-5-7629-1471-0 [in Russian].
- [34] O. Andriienko, S. Bilokin, and M. Bondarenko, "Features of creation of multiprobe system for nanometric measurements of geometrical and mechanical properties of surfaces of microsystem devices", in *Proc. XVII Int. Sci. Congress Machines. Technologies. Materials*, (Varna, Sept. 09-12, 2020). Varna, Bulgaria, 2020, vol. 2 (17), pp. 50-53. [Online]. Available: <http://mtmcongress.com/winter/sbornik/2-2020.pdf>.
- [35] A. Suslov, M. Bondarenko, and O. Andrienko, "Perspectives of development of multi-instrumental atomic-force microscopy under nanometric researches of components of microsystem equipment", in *VII Int. Sci.-Tech. Conf. Sensors, Devices and Systems – 2018*, (Lazurne, Sept. 17-21, 2018). Cherkasy, 2018, pp. 80-82 [in Ukrainian].
- [36] S. O. Bilokin, M. O. Bondarenko, Yu. Yu. Bondarenko, and V. S. Antoniuk, "Investigation of physical characteristics of dielectric surfaces with the help of a diagnostic stand based on an atomic force microscope", *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnologichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky: sci. coll.*, no. 2 (78), pp. 176-181, 2015 [in Ukrainian].
- [37] M. O. Bondarenko, "Investigation of mechanical characteristics of elements of precision instrumentation devices by atomic force microscopy", *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnologichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky*, no. 2, pp. 21-28, 2015 [in Ukrainian].
- [38] S. F. Petrenko, *Electric micromachines*. Kyiv, Ukraine: Korniiichuk, 2002 [in Ukrainian].
- [39] G. M. Dubrovskaya, Yu. I. Kovalenko, G. V. Kanashevich, and M. A. Bondarenko, "Study of the surface of nanostructured coatings of titanium nitride and carbonitride obtained by gas-phase deposition and ion-beam treatment", *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnologichnoho universitetu. Seriya: Tekhnichni nauki*, no. 2, pp. 56-60, 2006 [in Russian].
- [40] S. A. Bilokon, M. A. Bondarenko, and Yu. Yu. Bondarenko, "Determination of the adhesion strength of thin oxide coatings on dielectric materials by atomic force microscopy", *Nanosystemy, nanomaterialy, nanotekhnolohiyi*, vol. 12, no. 2, pp. 295-302, 2014 [in Russian].

[0000-0001-5359-5974] **I. S. Kobys¹**,
[0000-0002-4605-814X] **O. O. Brunov¹**,
[0000-0003-1544-6040] **O. I. Andriienko²**,
[0000-0003-1498-7005] **S. O. Bilokin², Ph. D.**,
[0000-0003-1281-1241] **S. V. Rotte², Ph. D., As. Prof.**,
[0000-0002-5927-0326] **M. O. Bondarenko², Dr. Tech. Sc., Associate Professor**
e-mail: m.bondarenko@chdtu.edu.ua

¹Cherkasy Research Forensic Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine
Pasterivska st., 104, Cherkasy, 18009, Ukraine

²Cherkasy State Technological University of the Ministry of Education and Science of Ukraine
blvd Shevchenko, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

INVESTIGATION OF FUNCTIONAL SURFACES OF MECHATRONIC DEVICES BY MULTIPROBE ATOMIC FORCE MICROSCOPY

The results of solving the problem of accelerating the study of the characteristics of functional surfaces of mechatronic devices by atomic force microscopy through the use of multiprobe tools, which provides the necessary levels of accuracy and reliability of the results, are shown. To do this, the surfaces of mechatronic elements have been studied to determine geometric (state, topology and morphology) and mechanical (microhardness, wear resistance and adhesive strength) characteristics of functional surfaces of mechatronic devices as a result of their experimental study by multiprobe atomic force microscopy. For the first time it is shown that the main advantage of the method of multiprobe atomic force microscopy in comparison with other methods of atomic force microscopy is the ability to study nanorelief and mechanical characteristics of functional surfaces of mechatronics products in one pass of the study area. At the same time, after removing the load from the action of the probe on the site, there is an elastic recovery of the surface, which minimizes its residual deformation. In general, the complete sequence of measurement studies by this method is given in the form of a block diagram. To confirm the adequacy of the results of experimental studies obtained by multiprobe atomic force microscopy, comparisons have been made with the results obtained by the basic method of atomic force microscopy, as well as with verification data obtained by alternative methods (interference microscopy, scanning electron microscopy, scanning electron microscopy, scanning Vickers microhardness). Based on the research, it has been first established that the use of the developed method of multiprobe atomic force microscopy allows: to increase 2.9 times the resolution of artifacts on the surface of the elements of mechatronic devices, to reduce the time of the study by 1.6... 1.9 times; to obtain surface morphology at the level of quality corresponding to the method of scanning electron microscopy; to determine the microhardness of materials in the range of 140 MPa... 44 GPa, wear resistance and change in the value of the adhesive strength of the functional coating on the surfaces of mechatronic devices (measurement error of these characteristics did not exceed 8 %). In future it is planned to investigate the influence of operating parameters and surface condition of the probes of the multiprobe instrument on the accuracy, quality and efficiency of the study by multi-probe atomic force microscopy.

Keywords: multiprobe atomic-force microscopy, mechatronic device, functional surface, surface topology, thin coating.

[0000-0002-1596-4123] **А. О. Лавданський**, канд. техн. наук, доцент,
e-mail: a.lavdanskyi@chdtu.edu.ua

[0000-0002-2046-481X] **Е. В. Фауре**, д-р техн. наук, професор,
[0000-0003-3488-2753] **В. О. Щерба**

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

ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОСТІ ОПЕРАЦІЙ МНОЖЕННЯ ПЕРЕСТАНОВОК ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ SIMD ІНСТРУКЦІЙ

У роботі розроблено та досліджено алгоритми виконання множення перестановок за допомогою використання SIMD інструкцій сучасних процесорів. Виконано аналіз SIMD інструкцій, що можуть бути використані для виконання операцій над перестановками. Розроблені алгоритми базуються на використанні розширених інструкцій процесорів, що дають змогу виконувати операції над даними, представленими у векторному форматі. Практично визначено та досліджено переваги використання SIMD інструкцій для підвищення швидкості виконання операцій над перестановками. Проведено аналіз та порівняння швидкості виконання операцій над перестановками з та без використання SIMD інструкцій. Розроблені алгоритми можуть бути використані при реалізації методів, що базуються на великій кількості операцій множення перестановок, що дасть можливість значно підвищити швидкість їх виконання.

Ключові слова: процесор, алгоритм, вектор, регістр, SSSE3, AVX2.

Вступ. Сучасні процесори є досить потужними, кількість виконуваних ними операцій за секунду обчислюється мільярдами, а кількість обчислювальних ядер – десятками. Проте існують часто використовувані алгоритми (наприклад, функції хешування та шифрування, операції над зображеннями, операції над даними, що представлені у векторному вигляді, тощо), апаратна реалізація яких може значно пришвидшити та зменшити енергоспоживання під час виконання розрахунків [1]-[4]. Виробники процесорів реалізують такі апаратні блоки в своїх продуктах та додають нові інструкції у системи команд процесорів для їх зручного використання.

Значне прискорення операцій над даними може бути досягнуто за виконання операцій, вхідні та вихідні дані яких представлені у векторному форматі. У такому випадку операції можуть бути виконані паралельно над усіма елементами вектора одночасно. Такий принцип обчислень називають SIMD (Single Instruction Multiple Data) за класифікацією, що наведено у [5], [6]. SIMD інструкції різного роду реалізовані у багатьох архітектурах процесорів, зокрема для найбільш популярних x86 і x86-64 (MMX, 3DNow!, SSE, SSE2, SSE3, SSSE3, SSE4.x, AVX, AVX2, AVX512)

та ARM (NEON). Повний список SIMD інструкцій, що реалізовані у процесорах Intel, наведений у [7].

Варто зазначити, що не тільки сучасні процесори можуть ефективно виконувати команди над даними, що представлені у векторному форматі. Сучасні відеоприскорювачі (відеокарти) можуть містити тисячі обчислювальних ядер (наприклад, до 10496 скалярних процесорів (ядер CUDA) у сучасних відеокартах компанії NVIDIA [8]), що можуть бути використані для прискорення операцій над даними, представленими у векторному форматі. Разом з тим, не всі комп'ютерні системи обладнані вбудованими або дискретними відеоприскорювачами необхідної обчислювальної потужності, а деякі взагалі їх позбавлені (наприклад, серверні системи). Саме тому задача розробки засобів прискорення операцій над перестановками за допомогою SIMD інструкцій сучасних процесорів є актуальною.

Зауважимо, що представити дані у векторному вигляді для їх обробки за допомогою SIMD інструкцій не завжди вдається. Якщо наступне значення операнду залежить від попереднього – паралельна обробка операндів неможлива. Проте операції над перестановками переважно виконуються одночасно над

усіма елементами перестановки, саме тому використання SIMD інструкцій є оптимальним для операцій над перестановками.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є підвищення продуктивності та зменшення енергоспоживання процесора під час виконання ним типових операцій над перестановками за рахунок створення алгоритмів для виконання операцій над перестановками з використанням SIMD інструкцій. Для виконання поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати аналіз SIMD інструкцій, що можуть бути використані для виконання операцій над перестановками;

- виконати розробку алгоритмів для виконання операцій над перестановками з використанням SIMD інструкцій;

- виконати аналіз та порівняння швидкості виконання операцій над перестановками з та без використання SIMD інструкцій.

Виклад основного матеріалу. У цій роботі розглянемо реалізації прискорення операцій над перестановками за допомогою SIMD інструкцій архітектури x86-64. Над перестановками можуть виконуватися такі операції: множення перестановок, пошук зворотної перестановки, розкладання на добуток циклів, пошук порядку перестановки, визначення парності перестановки та інші. Зокрема, для трьохетапного криптографічного протоколу на основі перестановок [9] використовуються такі операції, як множення перестановок, пошук зворотної перестановки, розкладання на добуток циклів, пошук порядку перестановки, визначення парності перестановки та інші. Зокрема, для трьохетапного криптографічного протоколу на основі перестановок [9] використовуються такі операції, як множення перестановок, пошук зворотної перестановки, розкладання на добуток циклів, пошук порядку перестановки, визначення парності перестановки та інші.

новок, пошук зворотної перестановки та розкладання перестановки на добуток циклів. Також перестановки використовуються у системах, що функціонують на основі факторіального кодування [10]-[13]. Прискорення зазначених операцій дасть змогу значно зменшити час, необхідний для виконання криптографічного перетворення повідомлень.

Однією з ключових операцій над перестановками є їх множення. Більшість операцій, що використовуються в трьохетапному криптографічному протоколі [9], є операції множення перестановок.

Добутком перестановок A та B довжини M є перестановка $C = A \cdot B$ така, що $C[i] = A[B[i]]$, де $A[i]$, $B[i]$, $C[i]$ – елементи перестановок, що знаходяться на позиції i , $i \in [0; M - 1]$. Прискорення операцій множення перестановок дасть можливість значно пришвидшити реалізації алгоритмів, що використовують ці операції.

Для проведення дослідження виконаємо реалізацію алгоритму (назвемо його «еталонний алгоритм») множення перестановок за допомогою мови програмування C (лістинг 1) без використання SIMD інструкцій. Змінні *first* та *second* є масивами з вхідними перестановками, результат множення зберігається у масиві *result*. Розмірність вхідних та результуючого масиву (довжина перестановки) визначається константою *ARR_SIZE*.

```
for (int i = 0; i < ARR_SIZE; i++) {  
    result[i] = first[second[i]];  
}
```

Лістинг 1 – Програмний код виконання множення перестановок на мові програмування C без використання SIMD інструкцій

Під час використання SIMD інструкцій дані, над якими необхідно виконати операції, необхідно помістити у спеціальні регістри. Доступні різні розміри регістрів (64, 128, 256, 512 біт залежно від інструкції), що можуть вміщувати як декілька цілих чисел, так і декілька чисел з плаваючою крапкою. Оскільки перестановкою є послідовність невід'ємних цілих чисел діапазону $[0, M - 1]$, а розмірність SIMD регістрів дорівнює 2^n , де $n \geq 6$ (може досягати значення 9 для інструкцій AVX512), будемо використовувати довжину перестановки $M = 2^n$. Це дасть змогу упакувати декілька слів перестановки в стандартні регістри SIMD інструкцій для проведення операцій над ними. Наприклад, для $n=8$ до регістру довжиною 64 біт можна помістити 8 слів перестановки.

Для виконання операції множення перестановок зручно використовувати SIMD інструкції, що дають можливість виконувати перемішування слів у регістрі. Зокрема, інструкції *pshufd* (SSE2), *pshufb* (SSSE3), *vpshufb* (AVX2) та *vpshufb* (AVX512) дають змогу перемістити слово першого регістра

за індексом, що знаходиться у другому регістрі.

Інструкція `pshufw` (SSE) дає змогу виконувати обробку чотирьох 16-розрядних слів перестановки, інструкція `pshufd` (SSE2) – чотирьох 32-розрядних слів, інструкція `pshufb` (SSSE3) – 16 або восьми 8-розрядних слів, інструкція `vpshufd` (AVX2) – восьми 32-розрядних слів, інструкція `vpshufb` (AVX2) – 32 8-розрядних слів, інструкція `vpshufb` (AVX512) – 64 8-розрядних слів, інструкція `vpshufd` (AVX512) – 16 32-розрядних слів. Зауважимо, що інструкції `vpshufb` (AVX2) та `vpshufd` (AVX2) виконують обробку даних у старших та молодших 128 бітах регістрів незалежно, тобто ці інструкції варто розглядати не як можливість обробки восьми 32-розрядних (або 32 8-розрядних) чисел, а як виконання обробки чотирьох 32-розрядних (або 16 8-розрядних) чисел одночасно [14].

Розглянемо сімейство інструкцій `*pshuf*` більш докладно. Залежно від інструкції вхідні, вихідні та регістри індексів можуть бути довжиною 64, 128, 256 та 512 біт. Тому для виконання множення перестановок необхідно упаковати слова перестановок у вхідні регістри. Це може бути виконано за допомогою спеціальних інструкцій сімейства `*movdqa*`, що дають змогу сформувати так званий вирівняний (aligned) формат регістра з даних з оперативної пам'яті. Також ці інструкції можуть бути використані для розпаку-

вання результуючого значення до оперативної пам'яті.

Для зручності проведення дослідження будемо використовувати функції-обгортки інструкцій на мові програмування C. Для інструкції `pshufb` (SSSE3) це

```
__m128i _mm_shuffle_epi8 (__m128i a,
                          __m128i b).
```

Для проведення множення перестановок за допомогою інструкції `pshufb` (SSSE3) в регістри необхідно завантажити упаковані (послідовність із 16 слів перестановки розрядністю 8 біт кожна) перестановки. Це може бути виконано за допомогою інструкції `movdqa` (SSE2), що може бути викликана за допомогою функції

```
__m128i _mm_load_si128 (__m128i
                       const* mem_addr).
```

Для отримання результату необхідно буде розпакувати дані, отримані у 128-бітному регістрі, виконаємо це за допомогою інструкції `movdqa` (SSE2), що може бути викликана за допомогою функції

```
void _mm_store_si128 (__m128i*
                    mem_addr, __m128i a).
```

Програмний код для виконання множення перестановок за допомогою інструкції `pshufb` (SSSE3) наведено у лістингу 2. Варто зазначити, що розмірність вхідних та результуючого масиву повинна бути 16 слів (перестановка з 16 елементів, $M=2^4$).

```
__m128i f = _mm_load_si128((__m128i*) & first[0]);
__m128i s = _mm_load_si128((__m128i*) & second[0]);
__m128i r = _mm_shuffle_epi8(f, s);
_mm_store_si128((__m128i*) & result[0], r);
```

Лістинг 2 – Програмний код для виконання множення перестановок за допомогою інструкції `pshufb` (SSSE3)

Для прикладу, на рисунку 1 зображено структурно схему виконання множення перестановок

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 1 & 3 & 2 & 6 & 5 & 4 & 0 & 7 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 5 & 6 & 4 & 7 & 2 & 1 & 0 & 3 \end{pmatrix}.$$
 Результатом такого множення буде перестановка

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 4 & 0 & 5 & 7 & 2 & 3 & 1 & 6 \end{pmatrix}.$$

Наведена реалізація алгоритму множення перестановок з використанням SIMD ін-

струкцій може бути використана для невеликих за розміром перестановок (16 або 32 слова). Проте часто виникає задача виконання множення перестановок значно більшої довжини (тисячі і більше елементів). У такому випадку використання сімейства інструкцій `*pshuf*` неможливе без додаткових модифікацій алгоритму.

Для виконання множення перестановок довільного розміру розглянемо використання інструкції `vpgatherdd` (AVX2). Обгортка цієї інструкції на мові програмування C має наступний вигляд:

`__m256i _mm256_i32gather_epi32 (int const* base_addr, __m256i vindex, const int scale)`

Інструкція `vpgatherdd` отримує 32-розрядні цілі числа з пам'яті за допомогою 32-розрядних індексів. 32-розрядні елементи завантажуються за адресами, що починаються

з `base_addr`, і зміщуються кожним 32-розрядним елементом у `vindex` (кожний індекс масштабується за коефіцієнтом, вказаним у `scale`). Зібрані елементи об'єднуються в `dst` (повертаються функцією). Значення `scale` повинне бути 1, 2, 4 або 8 [7].

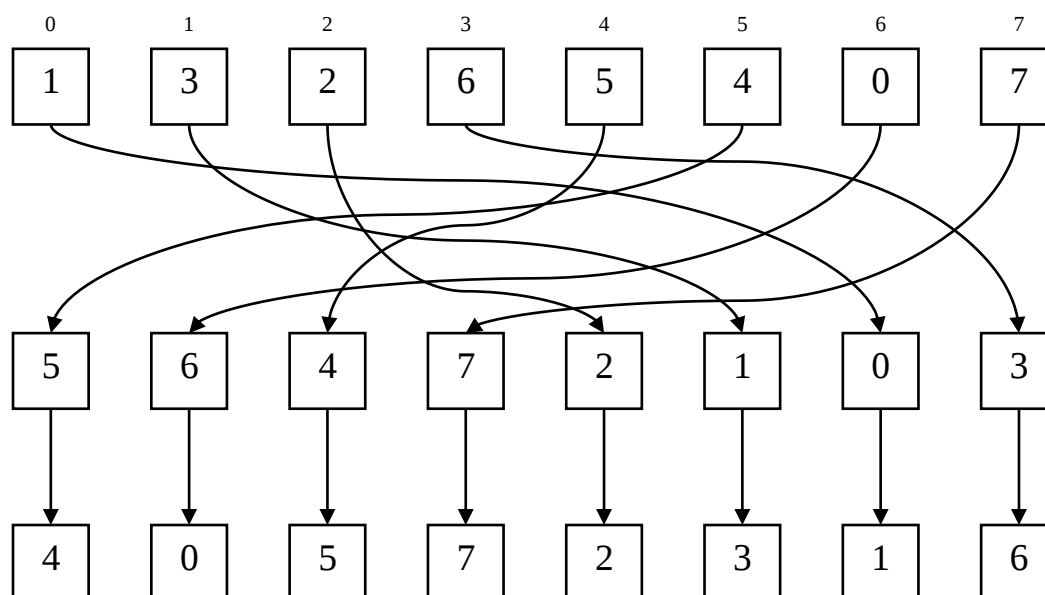


Рисунок 1 – Структурна схема виконання операції множення перестановок

Оскільки розмірність індексного регістру `vindex` становить 256 біт, а індекс для завантаження з пам'яті повинен бути 32-розрядним, обробка перестановки відбувається групами по $256/32=8$ слів.

Варто зазначити, що інструкція `vpgatherdd` фактично виконує завантаження

значень з оперативної пам'яті, яка, з точки зору процесора, є досить повільною (за час отримання даних проходять сотні тактів процесора). Тому, хоча й використання інструкції `vpgatherdd` є найпростішим, проте не є найефективнішим методом виконання множення перестановок.

```
for (int i = 0; i < ARR_SIZE; i += 8) {
    __m256i vindex = _mm256_load_si256((__m256i*) & second[i]);
    __m256i r = _mm256_i32gather_epi32((__m256i*)&first[0], vindex, 4);
    _mm256_store_si256((__m256i*) & result[i], r);
}
```

Лістинг 3 – Програмний код для виконання множення перестановок за допомогою інструкції `vpgatherdd` (AVX2)

Результати досліджень. Для проведення порівняння та оцінки продуктивності алгоритмів з та без використання SIMD інструкцій будемо використовувати бібліотеку `google/benchmark` [15]. Вона дає можливість визначити та порівняти час, необхідний для

проведення розрахунків, а також провести оцінку ступеня прискорення алгоритму, зокрема за використання SIMD інструкцій.

Оскільки SIMD інструкції реалізуються фізично на кристалі процесора, переваги від використання таких інструкцій можуть відрі-

знятися залежно від виробника. Тому для проведення досліджень використано дві платформи різних виробників.

Тестування проводилося з використанням процесорів Intel та AMD у таких конфігураціях:

- процесор INTEL Core i5 10400 (модулі пам'яті – DDR4 32GB (2x16GB) 2666 MHz);
- процесор AMD Ryzen 5 3600 (модулі пам'яті – DDR4 32GB (2x16GB) 3200 MHz).

Зауважимо, що метою дослідження не є порівняння продуктивності апаратного забезпечення різних виробників. Основною задачею є дослідження переваг використання SIMD інструкцій за допомогою конкретного апаратного забезпечення.

Результати порівняння еталонного алгоритму (розмір перестановки *ARR_SIZE* 16 слів) з алгоритмом з використанням SIMD інструкцій (лістинг 2) наведено на рисунку 2. У процесі тестування процесори працювали у режимі максимальної частоти.

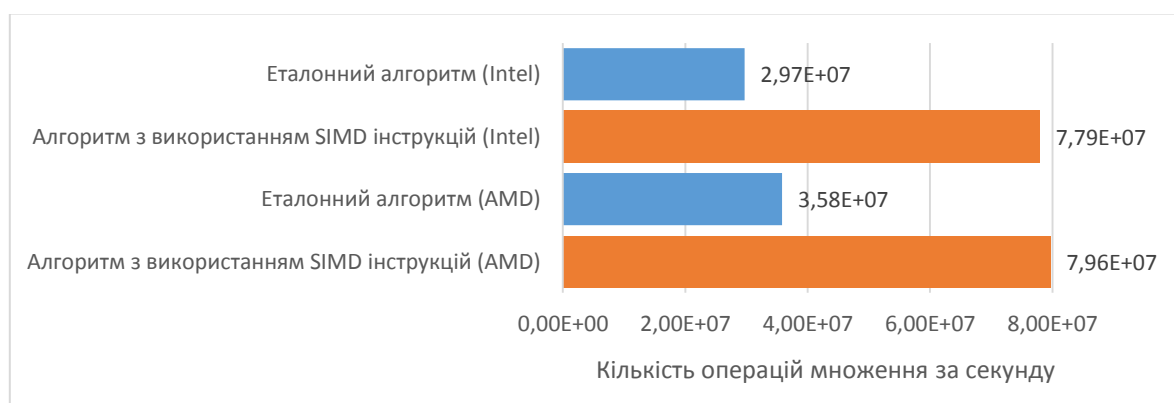


Рисунок 2 – Порівняння продуктивності еталонного алгоритму та алгоритму з використанням SIMD інструкцій

Відповідно до рисунка 2 використання інструкції *pshufb* (SSSE3) дає змогу прискорити виконання операцій множення перестановок у 2,2 разу для процесора AMD Ryzen 5 3600 та у 2,6 разу для процесора INTEL Core i5 10400.

Програмний код, наведений у лістингу 3, може бути використаний для виконання множення перестановок для будь-якого значення *M*, що кратне 8. Для значення *M*, не

кратного 8, необхідно доповнити перестановку до довжини, кратної 8, словами, значення яких відповідає індексу слова в перестановці. Після виконання множення ці додаткові слова необхідно відкинути.

Проведемо порівняння алгоритму множення перестановок, програмну реалізацію якого наведено в лістингу 3, з еталонною реалізацією для різних значень *M*. Результати дослідження зведено до таблиць 1 і 2.

Таблиця 1 – Результати виконання множення перестановок довільної довжини для процесора Intel Core i5 10400

Алгоритм	<i>M</i>	Кількість операцій множення за секунду (середнє з трьох спроб)	Прискорення
Еталонний алгоритм	16	$28.3320 * 10^6$	1.00
	32	$13.6533 * 10^6$	1.00
	128	$4.34424 * 10^6$	1.00
	512	$1.14688 * 10^6$	1.00
	4096	$146.286 * 10^3$	1.00
Алгоритм з використанням інструкції <i>vpgatherdd</i> (AVX2)	16	$49.0120 * 10^6$	1.72
	32	$35.3975 * 10^6$	2.59
	128	$10.8196 * 10^6$	2.49
	512	$2.89909 * 10^6$	2.52
	4096	$366.649 * 10^3$	2.50

Таблиця 2 – Результати виконання множення перестановок довільної довжини для процесора AMD Ryzen 5 3600

Алгоритм	M	Кількість операцій множення за секунду (середнє з трьох спроб)	Прискорення
Еталонний алгоритм	16	$35.3975 * 10^6$	1.00
	32	$21.4933 * 10^6$	1.00
	128	$6.37156 * 10^6$	1.00
	512	$1.70667 * 10^6$	1.00
	4096	$219.709 * 10^3$	1.00
Алгоритм з використанням інструкції vpgatherdd (AVX2)	16	$38.3316 * 10^6$	1.08
	32	$26.0655 * 10^6$	1.21
	128	$7.58519 * 10^6$	1.19
	512	$2.04800 * 10^6$	1.19
	4096	$254.862 * 10^3$	1.15

Обговорення результатів. Наведені реалізації алгоритмів множення перестановок з використанням SIMD інструкцій можуть бути використані для прискорення операцій над перестановками, зокрема в трьохетапному криптографічному протоколі на основі перестановок [9]. Використання SIMD інструкцій дає можливість прискорити операції множення перестановок до 2,6 разу (залежно від використаного апаратного забезпечення).

Варто зазначити, що залежно від реалізації апаратного забезпечення, результати використання SIMD інструкцій можуть значно відрізнятися. Зокрема, відповідно до таблиць 1 та 2 використання інструкції vpgatherdd (AVX2) на процесорі INTEL Core i5 10400 дає можливість отримати прискорення в середньому 2,5 разу. У той же час використання тієї самої інструкції процесора AMD Ryzen 5 3600 дає можливість досягти прискорення лише в 1,2 разу. Використання інших моделей процесорів також приведе до різних результатів.

Виконання операції множення перестановок за допомогою інструкції pshufb (SSSE3) для розміру перестановки 16 слів дає змогу досягти прискорення у 2,2 разу для процесора AMD Ryzen 5 3600 та у 2,6 разу для процесора INTEL Core i5 10400 відносно еталонного алгоритму.

Висновки. У роботі детально досліджено питання швидкодії однієї з найтипівіших процесорних операцій над перестановками – їх множення.

Наукова новизна роботи полягає в запропонованому підході до апаратної реалізації множення перестановок, який за рахунок

застосування SIMD інструкцій дає можливість зменшити час виконання цієї операції і, як наслідок, підвищити продуктивність і зменшити енергоспоживання процесора.

Практичну цінність роботи обумовлюють розроблені алгоритми множення перестановок, ефективність яких підтверджено порівнянням з класичними процедурами множення.

Разом з тим, перспективним є напрям пошуку методів виконання множення перестановок довільної довжини з використанням SIMD інструкцій сімейства *pshuf*, що дасть змогу досягти суттєвого приросту продуктивності, порівнюючи з алгоритмом, що використовує інструкції vpgatherdd (AVX2). Також використання відеоприскорювачів теоретично дасть можливість значно прискорити виконання операцій над перестановками за рахунок виконання обчислень паралельно за допомогою багатьох обчислювальних блоків відеокарт. Ці питання є предметом подальших досліджень.

Подяка. Роботу виконано в рамках науково-технічної (експериментальної) розробки молодих вчених «Розробка мобільної системи захищеного інформаційного обміну для військових і цивільних підрозділів державних структур» (№ ДР 0120U102607), а також стипендіальної роботи «Розробка методів і протоколів інтегрованого захисту інформації на основі факторіального кодування даних для мобільної системи інформаційного обміну» (№ ДР 0121U112454) в рамках іменної стипендії Верховної Ради України для молодих учених – докторів наук (Постанова Верховної Ради України від 14.07.2021 № 1641-IX).

Список використаних джерел

- [1] W. Mula, and D. Lemire, "Faster Base64 encoding and decoding using AVX2 instructions", *ACM Transactions on the Web (TWEB)*, vol. 12, no. 3, pp. 1-26, 2018.
- [2] A. Faz-Hernández, and J. López, "Fast implementation of Curve25519 using AVX2", in *International Conference on Cryptology and Information Security in Latin America*, 2015, pp. 329-345.
- [3] A. Lemmetti, A. Koivula, M. Viitanen, J. Vanne, and T. D. Hämäläinen, "AVX2-optimized Kvazaar HEVC intra encoder", in *2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2016, pp. 549-553.
- [4] W. Mula, N. Kurz, and D. Lemire, "Faster population counts using AVX2 instructions", *The Computer Journal*, vol. 61, no. 1, pp. 111-120, 2018.
- [5] M. J. Flynn, "Very high-speed computing systems", *Proceedings of the IEEE*, vol. 54, no. 12, pp. 1901-1909, 1966.
- [6] M. J. Flynn, "Some computer organizations and their effectiveness", *IEEE Trans. Comput.*, vol. 21, no. 9, pp. 948-960, 1972.
- [7] "Intel® Intrinsics Guide". [Online]. Available at: <https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/intrinsics-guide/index.html>.
- [8] "GeForce RTX 3090 Graphics Card | NVIDIA". [Online]. Available at: <https://www.nvidia.com/en-eu/geforce/graphics-cards/30-series/rtx-3090/>.
- [9] A. Shcherba, E. Faure, and O. Lavdanska, "Three-pass cryptographic protocol based on permutations", in *2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, 2020, pp. 281-284.
- [10] Е. В. Фауре, О. О. Харін, та А. О. Лавданський, "Оцінка властивостей синтезованих на основі теорії решіток сигнально-кодових конструкцій для нероздільних факторіальних кодів", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, с. 40-47, 2020.
- [11] Е. В. Фауре, В. В. Швидкий, А. І. Щерба, О. О. Харін, та Б. А. Ступка, "Метод циклової синхронізації на основі перестановок", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 67-76, 2020.
- [12] E. V. Faure, V. V. Shvydkyi, A. O. Lavdanskyyi, and O. O. Kharin, "Methods of factorial coding of speech signals", *Radio Electronics, Computer Science, Control*, no. 4, pp. 186-198, Nov. 2019.
- [13] E. Faure, A. Shcherba, Y. Vasiliu, and A. Fesenko, "Cryptographic key exchange method for data factorial coding", vol. 2654, p. 643, Aug. 2020.
- [14] "Programming using AVX2. Permutations". [Online]. Available at: <https://software.intel.com/content/www/us/en/develop/blogs/programming-using-avx2-permutations.html>.
- [15] "google/benchmark: A microbenchmark support library". [Online]. Available at: <https://github.com/google/benchmark>.

References

- [1] W. Mula, and D. Lemire, "Faster Base64 encoding and decoding using AVX2 instructions", *ACM Transactions on the Web (TWEB)*, vol. 12, no. 3, pp. 1-26, 2018.
- [2] A. Faz-Hernández, and J. López, "Fast implementation of Curve25519 using AVX2", in *International Conference on Cryptology and Information Security in Latin America*, 2015, pp. 329-345.
- [3] A. Lemmetti, A. Koivula, M. Viitanen, J. Vanne, and T. D. Hämäläinen, "AVX2-optimized Kvazaar HEVC intra encoder", in *2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2016, pp. 549-553.
- [4] W. Mula, N. Kurz, and D. Lemire, "Faster population counts using AVX2 instructions", *The Computer Journal*, vol. 61, no. 1, pp. 111-120, 2018.
- [5] M. J. Flynn, "Very high-speed computing systems", *Proceedings of the IEEE*, vol. 54, no. 12, pp. 1901-1909, 1966.
- [6] M. J. Flynn, "Some computer organizations and their effectiveness", *IEEE Trans. Comput.*, vol. 21, no. 9, pp. 948-960, 1972.
- [7] "Intel® Intrinsics Guide". [Online]. Available at: <https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/intrinsics-guide/index.html>.
- [8] "GeForce RTX 3090 Graphics Card | NVIDIA". [Online]. Available at: <https://www.nvidia.com/en-eu/geforce/graphics-cards/30-series/rtx-3090/>.
- [9] A. Shcherba, E. Faure, and O. Lavdanska, "Three-pass cryptographic protocol based on permutations", in *2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, 2020, pp. 281-284.

- [10] E. V. Faure, O. O. Kharin, and A. O. Lavdanskyyi, "Evaluation of properties of signal-code structures synthesized on the basis of lattice theory for inseparable factorial codes", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, no. 3, pp. 40-47, 2020 [in Ukrainian].
- [11] E. V. Faure, V. V. Shvydkyyi, A. I. Shcherba, O. O. Kharin, and B. A. Stupka, "Method of cyclic synchronization based on permutations", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, no. 4, pp. 67-76, 2020 [in Ukrainian].
- [12] E. V. Faure, V. V. Shvydkyyi, A. O. Lavdanskyyi, and O. O. Kharin, "Methods of factorial coding of speech signals", *Radio Electronics, Computer Science, Control*, no. 4, pp. 186-198, Nov. 2019.
- [13] E. Faure, A. Shcherba, Y. Vasiliu, and A. Fesenko, "Cryptographic key exchange method for data factorial coding", vol. 2654, p. 643, Aug. 2020.
- [14] "Programming using AVX2. Permutations". [Online]. Available at: <https://software.intel.com/content/www/us/en/develop/blogs/programming-using-avx2-permutations.html>.
- [15] "google/benchmark: A microbenchmark support library". [Online]. Available at: <https://github.com/google/benchmark>.

A. O. Lavdanskyyi, Ph. D., Associate Professor,
e-mail: a.lavdanskyyi@chdtu.edu.ua

E. V. Faure, Dr. Sc., Professor,
V. O. Shcherba

Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

INCREASING THE SPEED OF THE PERMUTATION MULTIPLICATION OPERATION DUE TO USE OF SIMD INSTRUCTIONS

Algorithms for performing permutation multiplication using SIMD (Single Instruction Multiple Data) instructions of modern processors are developed and investigated in the article. The purpose of the article is to increase the performance and reduce the power consumption of the processor during the executing of typical permutation operations by creating algorithms for performing permutation operations using SIMD instructions.

The scientific novelty of the article lies in the proposed approach to the hardware implementation of permutation multiplication, which through the use of SIMD instructions can reduce the execution time of this operation and, consequently, increase performance and reduce CPU power consumption. The practical value of the article is determined by the developed algorithms for permutation multiplication, the effectiveness of which is confirmed by comparison with classical multiplication procedures.

An analysis of SIMD instructions that can be used to perform permutation operations is performed. The developed algorithms are based on the use of advanced processor instructions that allow you to perform operations on data presented in vector format. The advantages of using SIMD instructions to increase the speed of permutation operations are practically identified and investigated. The analysis and comparison of the speed of permutation operations with and without the use of SIMD instructions are performed.

Described implementations of permutation multiplication algorithms using SIMD instructions can be used to accelerate permutation operations, in particular in the three-pass cryptographic protocol based on permutations. The use of SIMD instructions makes it possible to speed up permutation multiplication operations up to 2.6 times (depending on the hardware). The developed algorithms can be used in the implementation of methods based on a large number of permutation multiplication operations, which will significantly increase the speed of their execution.

Keywords: processor, algorithm, vector, register, SSSE3, AVX2.

[0000-0003-2039-2841] **В. Г. Бабенко**, д-р техн. наук, доцент,
[0000-0002-7588-1055] **Т. В. Миронюк**, канд. техн. наук, доцент,
e-mail: t.myroniuk@chdtu.edu.ua
[0000-0002-5589-9020] **Г. В. Кривоус**, аспірант

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

АЛГОРИТМИ ЗАСТОСУВАННЯ ОПЕРАЦІЙ ПЕРЕСТАНОВОК, КЕРОВАНИХ ІНФОРМАЦІЄЮ, ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ КРИПТОПЕРЕТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ

У статті запропоновано застосування базової групи операцій перестановок, керованих інформацією, з урахуванням трьох видів алгоритмів реалізації криптографічного перетворення: просте перемішування, гамування з ключем, гамування з ключем із заданою кількістю раундів. Розроблено алгоритми використання операцій перестановок, керованих інформацією, з метою застосування їх як у програмних, так і в апаратних засобах криптографічного захисту інформації. Проведено оцінювання ефективності цих алгоритмів на основі їх програмної реалізації та статистичного тестування пакетом тестів NIST STS. Здійснено аналіз статистичних портретів одержаних результатів роботи розроблених алгоритмів з метою оцінки їх придатності в процесі побудови криптографічних алгоритмів. Показано, що для практичної реалізації криптографічного алгоритму на основі використання запропонованих операцій перестановок, керованих інформацією, потрібно визначити практичну криптографічну стійкість алгоритму, що напряму залежить від довжини пароля та кількості операцій, що застосовуються для шифрування інформації. Крім того, наведено розрахунок варіативності алгоритмів застосування для криптографічного перетворення декількох блоків інформації.

Ключові слова: перестановка, базова операція, дискретна модель, криптографічне перетворення, статистичне тестування, раунд, псевдовипадкова послідовність, блок-схема алгоритму.

Вступ. Застосування перестановки як однієї з базових операцій перетворення інформації характерне при вирішенні багатьох прикладних задач, наприклад, для захисту інформації при розробці алгоритмів блокового та потокового шифрування, для підвищення ефективності алгоритмів стиснення інформації при використанні перестановки в алгоритмах перетворення інформації з метою подання даних у зручнішому вигляді для подальшого стиснення, для реалізації алгоритмів кодування даних та багатьох інших [1-3]. Найпоширенішими базовими для симетричних криптографічних алгоритмів є такі типи перестановок: проста перестановка, одинарна перестановка з ключем, подвійна перестановка, перестановка «магічний квадрат», циклічна перестановка та комбінаційні перестановки [2, 5].

Для реалізації криптографічного перетворення інформації перестановки поєднують із додаванням за модулем, тому що ці операції доповнюють одна одну і в сукупності з іншими

операціями забезпечують якість криптографічного перетворення. Виходячи з цього, було б доцільно поєднати в одній операції властивості як додавання за модулем, так і перестановок.

Розробка нових та вдосконалення поширених методів шифрування, які були б простими в апаратній та програмній реалізації і в той же час забезпечували досить високий рівень криптографічної стійкості за рахунок розширення спектра використовуваних операцій криптографічного перетворення, отриманих шляхом модифікації базових операцій, є одним із актуальних завдань інформаційної безпеки [1, 2].

Варто відзначити, що збільшення кількості операцій, придатних для реалізації криптографічних перетворень, має вагомий переваги: з одного боку, розширює можливості розробників криптографічних алгоритмів, а з другого – ускладнює роботу криптографічних аналітиків [1-3].

Пошук та синтез модифікованих операцій для криптографічного перетворення дадуть змогу будувати алгоритми з їх використанням із кращими криптографічними властивостями, що робить це дослідження актуальним.

Програмні засоби криптографічного захисту відрізняються гнучкістю, що дає їм особливу перевагу, порівняно з апаратними. А мобільність і простота використання пояснюють їх сучасну популярність та поширеність. Тому серед засобів поліпшення показників стійкості криптоалгоритмів можна виділити кілька підходів щодо побудови програмних шифрів. Найбільш перспективними для програмної реалізації є гнучкі шифри [5], що базуються на використанні декількох модифікацій алгоритму шифрування, шифри з псевдовипадковою вибіркою ключів і шифри з перестановкою фіксованих процедур та налаштуванням операцій перетворення. Крім цього, одним із відомих способів підвищення криптостійкості є багатопрохідний режим застосування алгоритму шифрування [5, 6].

Застосування керованих операцій [5] відкриває великі можливості у досягненні необхідного рівня криптозахисту. Враховуючи те, що ефективність використання керованих операцій збільшується зі зростанням числа потенційно реалізованих модифікацій, оскільки в цьому випадку розширюється підблок даних, що перетворюються, набуває актуальності використання операції перестановки, бо вона має дуже велику кількість модифікацій [5]. Таким чином, розробка криптографічних засобів на основі керованих перестановок є перспективним напрямом у сучасній криптографії.

Особливу увагу в публікаціях з цієї тематики приділено математичним основам методів теорії захисту інформації, криптографії, цифрової стеганографії, а також особливостям їх реалізації та застосування [1-7].

Серед останніх досліджень і публікацій варто виділити дослідження [8, 9], де на основі синтезу та аналізу операцій двохоперандного додавання за модулем два та чотири здійснено моделювання двохоперандних дворозрядних матричних операцій, які мають властивості, необхідні для криптоперетворення, а в [10] проведено синтез та дослідження дворозрядного додавання за модулем два множини операцій криптографічного перетворення з

точністю до перестановки, а також обґрунтовано можливість використання операцій виявленої групи як операції криптографічного додавання за модулем два. Роботи [11, 12] присвячені дослідженню груп операцій, синтезованих на основі додавання за модулем два, з точністю до перестановки з метою встановлення взаємозв'язків між групами та операндами. В [11] на основі визначених особливостей операцій групи виявлено взаємозв'язки між операціями, що дозволило використовувати синтезовані операції для прямого й оберненого перетворення інформації. В статті [12] представлено результати дослідження щодо застосування операцій додавання за модулем два та перестановки для розробки матричних операцій криптографічного перетворення. За результатами проведеного обчислювального експерименту здійснено поділ матричних моделей криптоперетворення на три групи за наявністю та типом перестановки в них.

У роботі [13] наведено результати дослідження статистичних властивостей сучасних поточкових алгоритмів. Дослідження проводилися на основі методики статистичного тестування, що дозволило оцінити показники статистичної безпеки алгоритму, зокрема визначити непередбачуваність та випадковість формованих послідовностей, які є результатами роботи цих алгоритмів.

Проте дослідженню можливості використання групи операцій перестановок, керованих інформацією, для реалізації криптографічного перетворення не приділялось достатньої уваги.

Мета та задачі дослідження: розробка способів реалізації криптографічного перетворення інформації шляхом синтезу алгоритмів застосування операцій перестановок, керованих інформацією, та здійснення аналізу щодо їх придатності для використання в криптографічних алгоритмах.

Виклад основного матеріалу. Для розробки різних способів застосування операцій перестановок, керованих інформацією, при розробці алгоритмів реалізації криптографічного перетворення спочатку потрібно розглянути процес їх синтезу. При проведенні досліджень операцій криптографічного перетворення було встановлено, що загальна кількість цих операцій включає базові операції, операції перестановки та операції інверсії:

$$N = N_{\bar{o}} \cdot N_n \cdot N_i = N_{\bar{o}} \cdot 3! \cdot 2^3 = 384,$$

де N – загальна кількість операцій, $N_{\bar{o}}$ – кількість базових операцій, N_n – кількість операцій перестановки, N_i – кількість операцій інверсії [14, 15]. Отже, для визначення кількості, наприклад, трирозрядних базових операцій криптографічного перетворення необхідно вирахувати із загальної кількості операцій криптографічного перетворення кількість базових трирозрядних операцій.

У результаті розрахунків отримуємо, що кількість базових операцій для цього випадку $N_{\bar{o}} = 8$.

У таблиці 1, де $F_{n,m,l}^k$ та $F_{n,m,l}^d$ – операції шифрування та розшифрування відповідно, а n, m, l – номери елементарних функцій перетворення, з яких утворена операція, представлено дискретну модель базових груп операцій, побудованих на основі визначених восьми базових операцій, що можуть бути використані для криптографічного перетворення інформації в системах захисту інформації [16].

Таблиця 1 – Дискретна модель представлення криптографічних операцій шифрування-розшифрування

№	Базова група операцій шифрування	Базова група операцій розшифрування
1	$F_{92,46,27}^k = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot x_3 \end{bmatrix}$	$F_{83,116,78}^d = \begin{bmatrix} x_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \\ \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \end{bmatrix}$
2	$F_{53,71,27}^k = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot x_3 \end{bmatrix}$	$F_{83,29,39}^d = \begin{bmatrix} x_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \end{bmatrix}$
3	$F_{83,29,39}^k = \begin{bmatrix} x_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \end{bmatrix}$	$F_{53,71,27}^d = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot x_3 \end{bmatrix}$
4	$F_{58,29,78}^k = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \end{bmatrix}$	$F_{53,46,114}^d = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \\ \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \end{bmatrix}$
5	$F_{58,116,39}^k = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \\ \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \end{bmatrix}$	$F_{92,71,114}^d = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \\ \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \end{bmatrix}$
6	$F_{53,46,114}^k = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \\ \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \end{bmatrix}$	$F_{58,29,78}^d = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \end{bmatrix}$

Закінчення таблиці 1

№	Базова група операцій шифрування	Базова група операцій розшифрування
7	$F_{92,71,114}^k = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \\ \bar{x}_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \end{bmatrix}$	$F_{58,116,39}^d = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee x_1 \cdot \bar{x}_3 \\ \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot x_3 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \end{bmatrix}$
8	$F_{83,116,78}^k = \begin{bmatrix} x_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \\ \bar{x}_1 \cdot x_2 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 \cdot x_3 \end{bmatrix}$	$F_{92,46,27}^d = \begin{bmatrix} x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee \bar{x}_1 \cdot x_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_2 \vee x_2 \cdot \bar{x}_3 \\ x_1 \cdot \bar{x}_3 \vee x_2 \cdot x_3 \end{bmatrix}$

З метою перевірки коректності результатів, отриманих експериментальним способом для базових груп операцій шифрування-розшифрування, було розроблено програмне забезпечення на основі таких алгоритмів:

1. Простого перемішування.
2. Виконання гамування з ключем.
3. Виконання гамування з ключем із заданою кількістю раундів.

Потрібно зазначити, що під час програмної реалізації вказаних вище алгоритмів ключова інформація передається закритим каналом зв'язку.

Алгоритм реалізації програмного забезпечення для шифрування-розшифрування інформації на основі базових операцій перестановок, керованих інформацією, отриманих шляхом обчислювального експерименту, розроблено на основі методу простого перемішування та зображено у вигляді блок-схеми на рисунку 1.

Відповідно до побудованої блок-схеми реалізації алгоритму роботи програмного засобу етапи його виконання складаються з наступних кроків:

1. Відкриваємо вхідний файл будь-якого типу та зчитуємо його дані.
2. Зчитування даних, що знаходяться у відкритому файлі, відбувається послідовно по три байти інформації.
3. Випадковим чином (з використанням генератора псевдовипадкової послідовності) перемішуємо прочитані три байти інформації.
4. Обираємо функцію шифрування для вибраних байтів.

5. Шифруємо прочитані три байти інформації обраним методом шифрування.

6. Випадковим чином інвертуємо кожен із зашифрованих байтів.

7. Записуємо отримані три байти інформації у результуючий (зашифрований) файл.

8. Здійснюємо перевірку умови: якщо не досягнуто кінця файлу, переходимо до пункту 2, інакше – продовжуємо кроки виконання алгоритму.

9. Процес роботи програми завершено.

Алгоритм роботи програмного продукту для розшифрування результуючого файлу представлено на рисунку 2. Опис кроків його реалізації аналогічний алгоритму шифрування, наведеному вище.

Однак при застосуванні лише одного запропонованого алгоритму роботи програмного засобу для шифрування та розшифрування інформації визначеною групою базових операцій не можна стверджувати, що зазначена базова група є ефективною при її реалізації. Тому нами запропоновано розробити ще два алгоритми реалізації криптографічного перетворення інформації на основі застосування отриманої групи базових операцій з метою перевірки правильності одержаних результатів.

Надалі запропоноване програмне забезпечення для реалізації перевірки правильності застосування отриманої групи базових операцій криптографічного перетворення було реалізовано для алгоритму на основі виконання гамування з ключем.

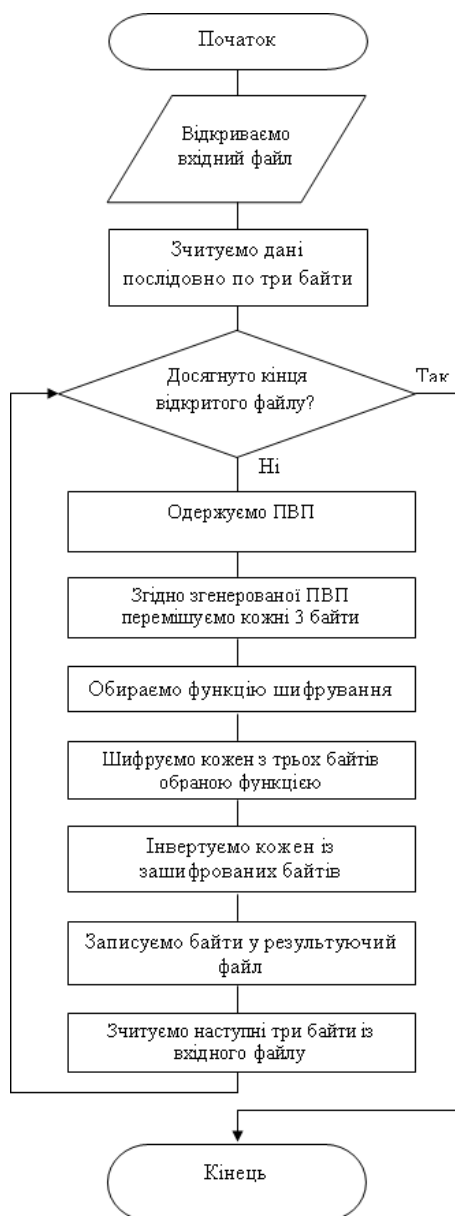


Рисунок 1 – Граф-схема алгоритму шифрування вхідних даних визначеною групою базових операцій на основі простого перемішування

Алгоритм роботи запропонованого способу реалізації криптографічного перетворення складається з таких кроків:

1. Відкриваємо вхідний файл будь-якого типу та зчитуємо його дані.
2. Зчитуємо дані, що знаходяться у відкритому файлі, послідовно по три байти інформації.
3. Обираємо функцію шифрування для байтів інформації.
4. Шифруємо прочитані три байти інформації обраним методом шифрування.

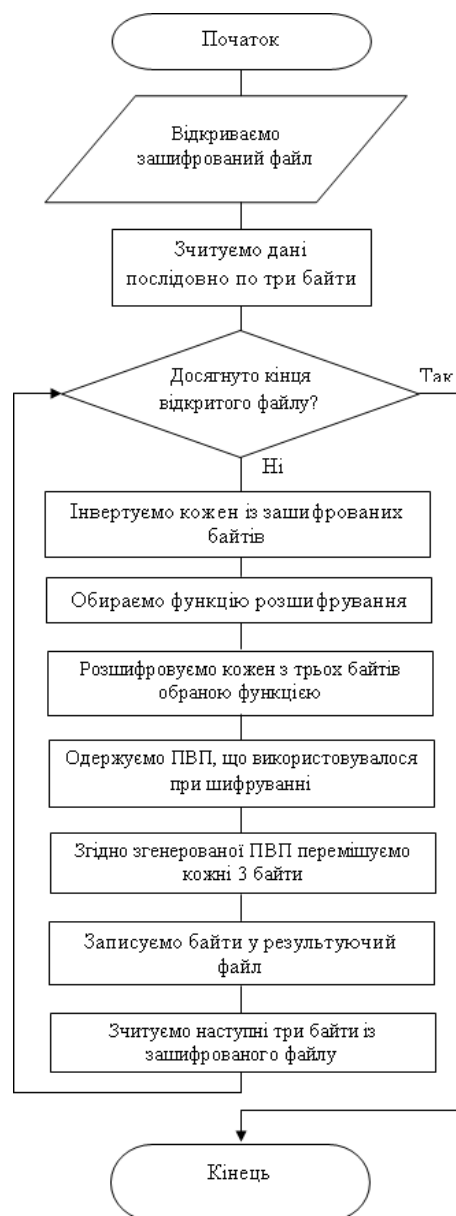


Рисунок 2 – Граф-схема алгоритму розшифрування вхідних даних визначеною групою базових операцій на основі простого перемішування

5. Виконуємо процес гамування з ключем.

6. Отримані три байти інформації записуємо у результуючий файл.

7. У разі, якщо не було досягнуто кінця файлу, то переходимо до пункту 2.

8. Процес роботи програми завершено.

Алгоритм роботи відповідного методу розшифрування результуючого файлу описується аналогічно крокам, що реалізують алгоритм шифрування.

Відповідно до алгоритму роботи описаного вище програмного засобу побудуємо блок-схеми способів реалізації методів шиф-

рування та розшифрування інформації, які матимуть наступний вигляд та зображені на рисунках 3 та 4 відповідно.

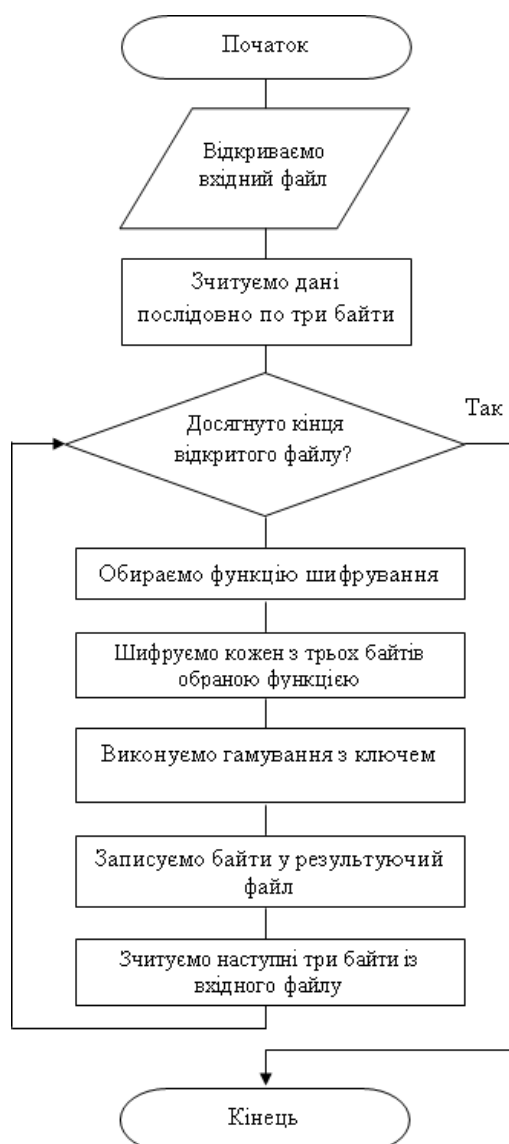


Рисунок 3 – Граф-схема алгоритму шифрування вхідних даних визначеною базовою групою операцій на основі виконання гамування з ключем

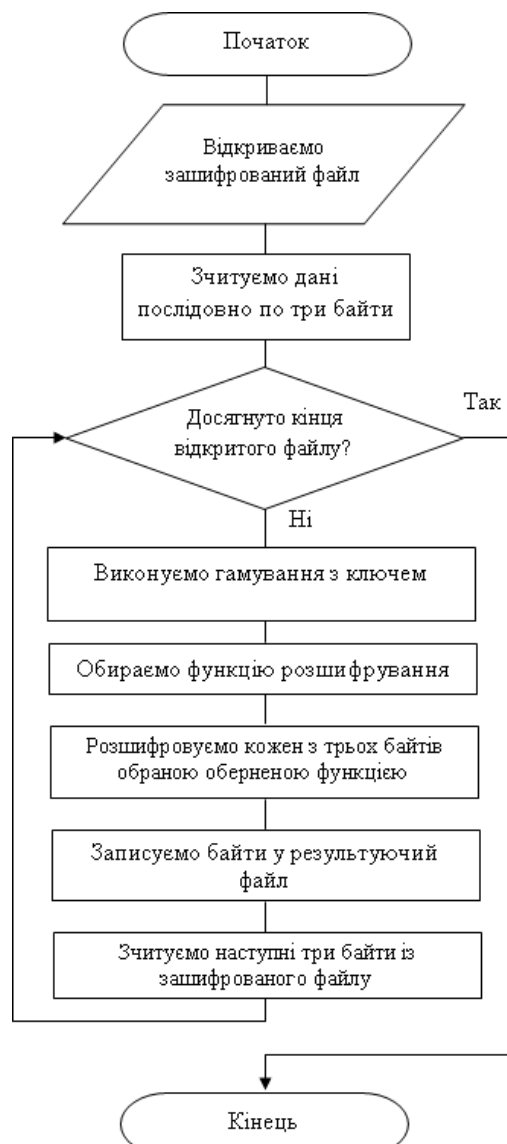


Рисунок 4 – Граф-схема алгоритму розшифрування вхідних даних оберненою групою до визначеної базової групи операцій на основі виконання гамування з ключем

Програмну реалізацію іншого способу криптографічного перетворення інформації, що забезпечується шифруванням даних визначеною базовою групою операцій, здійснено з використанням алгоритму на основі виконання гамування з ключем із визначеною кількістю циклів (раундів) перетворення да-

них та відображено у вигляді граф-схеми, наведеної на рисунку 5. На рисунку 6 наведено граф-схему реалізації алгоритму для розшифрування вхідних даних оберненою базовою групою операцій на основі виконання гамування з ключем із заданою кількістю циклів (раундів) перетворення інформації.

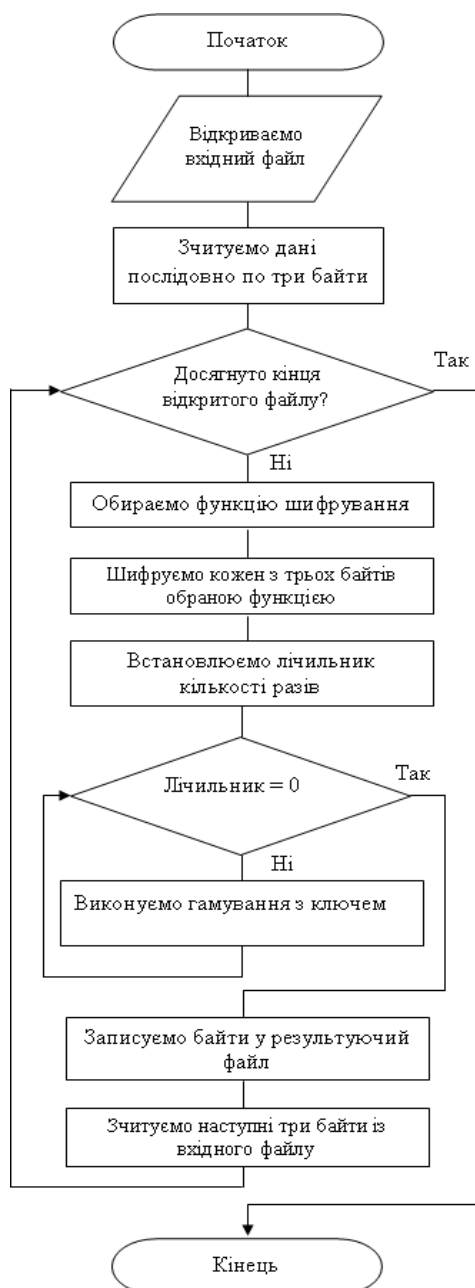


Рисунок 5 – Граф-схема алгоритму шифрування вхідних даних базовою групою операцій на основі виконання гамування з ключем із заданою кількістю циклів (раундів) перетворення інформації

Алгоритм роботи реалізованого програмного продукту, що наведено на рисунку 5, складається з таких кроків:

1. Відкриваємо вхідний файл будь-якого типу та зчитуємо його дані.
2. Зчитуємо дані, що знаходяться у відкритому файлі, послідовно по три байти інформації.

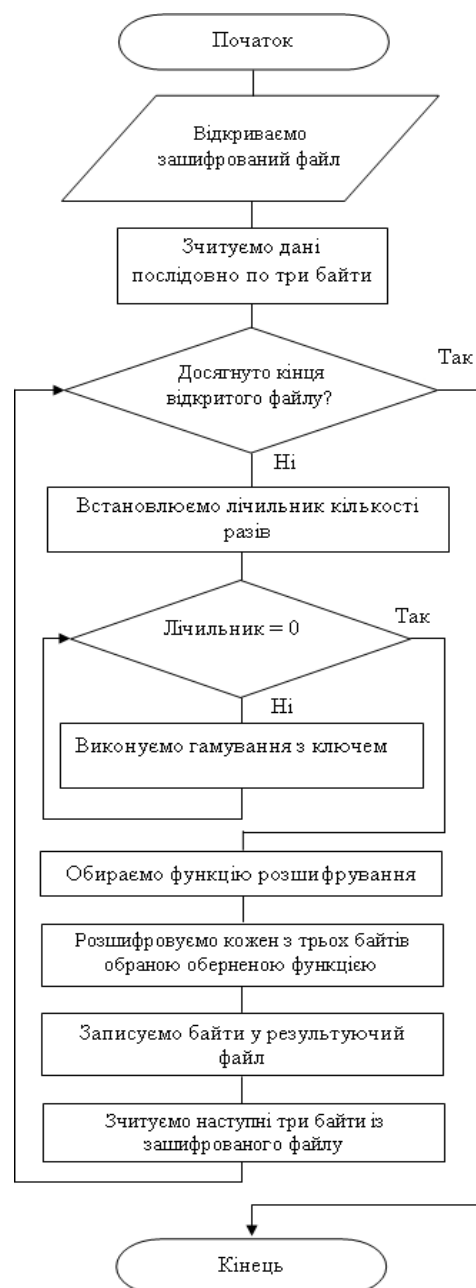


Рисунок 6 – Граф-схема алгоритму розшифрування вхідних даних оберненою базовою групою операцій на основі виконання гамування з ключем із заданою кількістю циклів (раундів) перетворення інформації

3. Обираємо функцію шифрування для байтів інформації.

4. Шифруємо прочитані три байти інформації обраним методом шифрування.

5. Вказуємо кількість циклів (раундів) перетворення (шифрування).

6. Виконуємо гамування з ключем.

7. Здійснюємо перевірку умови: якщо лічильник раундів не рівний 0, виконуємо по-

вернення до пункту 6, інакше – продовжуємо виконання наступних кроків (до пункту 8).

8. Записуємо отримані три байти інформації у результуючий файл.

9. Здійснюємо перевірку умови: якщо не досягнуто кінця файлу, переходимо до пункту 2, інакше – пункт 10.

10. Завершення роботи програми.

Алгоритм роботи програмного забезпечення, розробленого для розшифрування результуючого (зашифрованого) файлу оберненою базовою групою операцій на основі виконання гамування з ключем заданою кількістю циклів (раундів), описується аналогічно до алгоритму шифрування.

Результати дослідження. Для перевірки ефективності розроблених алгоритмів роботи програмної реалізації способів шифрування та розшифрування інформації визначеною групою базових операцій перестановок, керованих інформацією, було проведено оцінювання статистичних властивостей результатів їх реалізацій за допомогою пакету статистичних тестів NIST STS [17]. NIST STS містить 15 статистичних тестів, що розроблені для перевірки гіпотези щодо випадковості двійкових послідовностей довільної довжини [17, 20-22].

Для здійснення тестувань були обрані такі параметри: довжина послідовності, що тестується, $n = 10^6$ біт; кількість послідовностей, що тестується, $m = 100$; рівень значущості $\alpha = 0,01$; кількість тестів $q = 189$ [17-22].

Таким чином, обсяг вибірки, що тестується, становив $N = 10^6 \times 100 = 10^8$ біт, кількість тестів (q) для різних довжин $q = 189$. Отже, статистичний портрет ПВП містить 18 900 значень імовірності P [17, 20].

В ідеальному випадку при $m = 100$ і $\alpha = 0,01$ у ході тестування може бути відкинута тільки одна послідовність зі ста, тобто коефіцієнт проходження кожного тесту має становити 99%. Однак це занадто жорстке правило, тому застосовується правило на основі довірчого інтервалу, згідно з яким нижня межа дорівнює 0,96015 [17, 20-22].

Результатом тестування алгоритму на основі простого перемішування з метою перевірки придатності використаних базових операцій для криптографічного перетворення є статичний портрет, що зображено на рисунку 7 [18].

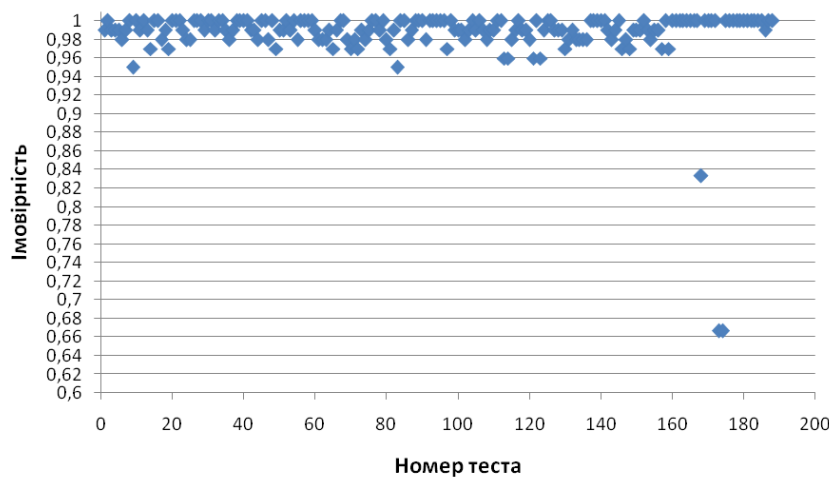


Рисунок 7 – Графічна діаграма статистичних властивостей програмної розробки алгоритму на основі простого перемішування для криптоперетворення текстового файлу

Підсумковий результат тестування визначеною базовою групою операцій за допомогою реалізованого алгоритму на основі простого перемішування програмним пакетом NIST STS наведено в таблиці 2.

Як видно з результатів (таблиця 3), п'ять тестів не було пройдено, а це означає,

що досліджувана послідовність не пройшла комплексний контроль за методикою NIST STS [17].

Результатом перевірки реалізованого алгоритму на основі гамування з ключем для криптоперетворення є графічна діаграма статистичних властивостей, зображена на рисунку 8.

Таблиця 2 – Зведені результати тестування текстового файлу базовою групою операцій перестановок, керованих інформацією, за допомогою алгоритму на основі простого перемішування

Генератор	Кількість тестів, які пройдено успішно, кількість (відсоток від загальної кількості)	
	99 % послід.	96 % послід.
Криптоалгоритм із застосуванням операцій перестановок, керованих інформацією	137 (72,4 %)	184 (97,3 %)

Таблиця 3 – Результати тестів, що не пройшли перевірку

РЕЗУЛЬТАТИ ДЛЯ РІВНОЙМОВІРНОСТІ Р-ЗНАЧЕНЬ І ПРОПОРЦІЇ (ЧАСТКА) ПОСЛІДОВНОСТЕЙ, ЩО ПРОЙШЛИ ТЕСТУВАННЯ												
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Р-ЗНАЧЕННЯ	ПРОПОРЦІЯ	НАЗВА СТАТИСТИЧНОГО ТЕСТУ
11	13	10	9	11	13	7	12	3	11	0.494392	0.9500 *	Тест на збіг шаблонів, що не перекриваються
12	12	10	9	11	15	5	12	3	11	0.249284	0.9500 *	
2	1	2	0	0	0	1	0	0	0	----	0.8333 *	Варіант тесту на довільні відхилення
2	0	0	0	0	0	1	0	1	2	----	0.6667 *	
2	0	0	1	0	0	0	1	1	1	----	0.6667 *	

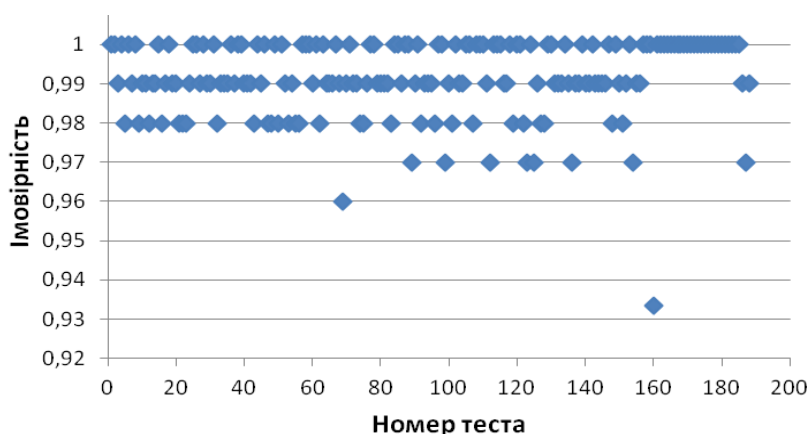


Рисунок 8 – Графічна діаграма статистичних властивостей програмної розробки алгоритму на основі гамування з ключем для криптоперетворення текстового файлу

Підведені результати тестування текстового файлу програмним пакетом NIST STS, що було сформовано із застосуванням алгоритму на основі гамування з ключем отриманою базовою групою операцій перестановок, керованих інформацією, подано в таблиці 4.

Як видно з результатів дослідження, послідовність не пройшла комплексний контроль за методикою NIST STS, оскільки не був пройдений один тест. Результати тестування наведено в таблиці 5.

Результатом перевірки програмної розробки алгоритму на основі гамування з ключем із заданою кількістю циклів (раундів) для криптоперетворення є графічна діаграма статистичних властивостей, наведена на рисунку 9.

Зведений результат тестування визначеної групи базових операцій перестановок, керованих інформацією, за допомогою розробленого алгоритму для криптографічного перетворення текстового файлу програмним пакетом NIST STS подано в таблиці 6.

Таблиця 4 – Зведені результати тестування текстового файлу базовою групою операцій перестановок, керованих інформацією, за допомогою алгоритму на основі гамування з ключем

Генератор	Кількість тестів, які пройдено успішно, кількість (відсоток від загальної кількості)	
	99 % послід.	96 % послід.
Криптоалгоритм із застосуванням операцій перестановок, керованих інформацією	148 (78,3 %)	188 (95,5 %)

Таблиця 5 – Результати тестів, що не пройшли перевірку

РЕЗУЛЬТАТИ ДЛЯ РІВНОЙМОВІРНОСТІ Р-ЗНАЧЕНЬ І ПРОПОРЦІЇ (ЧАСТКА) ПОСЛІДОВНОСТЕЙ, ЩО ПРОЙШЛИ ТЕСТУВАННЯ												
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Р-ЗНАЧЕННЯ	ПРОПОРЦІЯ	НАЗВА СТАТИСТИЧНОГО ТЕСТУ
1	0	1	2	1	6	1	1	0	2	0.000648	0.9333 *	Тест на довільні відхилення

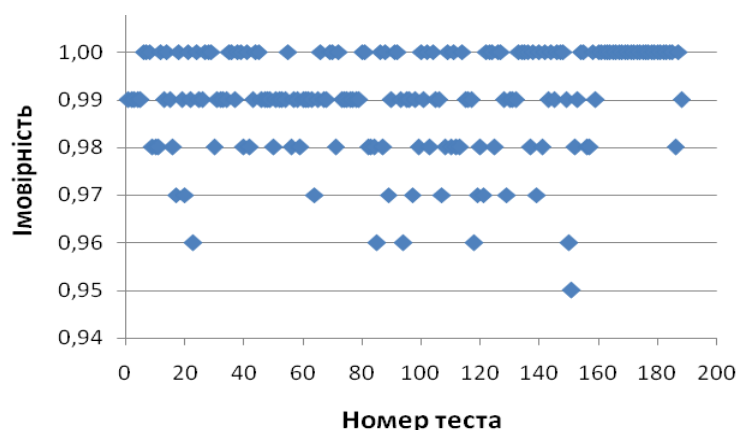


Рисунок 9 – Графічна діаграма статистичних властивостей програмної розробки алгоритму на основі гамування з ключем із заданої кількості раундів для криптоперетворення текстового файлу

Таблиця 6 – Зведені результати тестування текстових даних з використанням базової групи операцій перестановок, керованих інформацією, за алгоритмом на основі гамування з ключем із заданої кількості циклів (раундів) перетворення інформації

Генератор	Кількість тестів, які пройдено успішно, кількість (відсоток від загальної кількості)	
	99 % послід.	96 % послід.
Криптоалгоритм із застосуванням операцій перестановок, керованих інформацією	155 (81,4 %)	188 (99,5 %)

Як видно з результатів, досліджувана послідовність не пройшла комплексний конт-

роль за методикою NIST STS, тому що не був пройдений один тест (таблиця 7).

Таблиця 7 – Результати тестів, що не пройшли перевірку

РЕЗУЛЬТАТИ ДЛЯ РІВНОЙМОВІРНОСТІ Р-ЗНАЧЕНЬ І ПРОПОРЦІЇ (ЧАСТКА) ПОСЛІДОВНОСТЕЙ, ЩО ПРОЙШЛИ ТЕСТУВАННЯ												
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Р-ЗНАЧЕННЯ	ПРОПОРЦІЯ	НАЗВА СТАТИСТИЧНОГО ТЕСТУ
11	13	14	13	8	7	9	9	9	7	0.739918	0.9500 *	Тест на збіг шаблонів, що не перекриваються

Обговорення результатів. Для розроблених алгоритмів роботи програмного засобу для шифрування та розшифрування даних певною групою базових операцій було проведено оцінку ефективності їх реалізацій за допомогою системи оцінки статистичних властивостей NIST STS [19, 20].

Отримані результати для алгоритмів, які реалізовані із застосуванням групи базових

операцій перестановок, керованих інформацією, і використовуються з метою криптографічного перетворення текстової інформації, було перевірено за допомогою пакету тестів NIST STS [17, 21, 22]. Зведені результати тестування щодо використання операцій перестановок, керованих інформацією, для криптографічного перетворення представлено у таблиці 8.

Таблиця 8 – Зведені результати тестування псевдовипадкових послідовностей, отриманих в процесі шифрування текстових даних, на основі алгоритмів із застосуванням операцій перестановок, керованих інформацією, для криптоперетворення

Алгоритм застосування операцій перестановок, керованих інформацією, для криптоперетворення	Кількість тестів з успішним тестуванням, кількість (відсоток від загальної кількості)	
	99 % послід.	96 % послід.
На основі простого перемішування	137 (72,4 %)	184 (97,3 %)
На основі гамування з ключем	148 (78,3 %)	188 (95,5 %)
На основі гамування із ключем із заданою кількістю циклів (раундів) перетворення інформації	155 (81,4 %)	188 (99,5 %)

Аналіз результатів тестування пакетом тестів NIST STS запропонованих способів та алгоритмів реалізації операцій перестановок, керованих інформацією, з урахуванням псевдовипадкової (гамуючої) послідовності, показав, що статистичні властивості згенерованих послідовностей практично відповідають вимогам NIST STS, а наявні відхилення від вимог в межах від 0,5 % до 2,7 % обумовлені недостатньою кількістю операцій, що була відібрана для реалізації криптографічного перетворення під час проведення тестування. Тому доцільно використовувати їх з іншими алгоритмами криптографічного перетворення.

Щоб зашифрувати один блок інформації (C) використовується 384 отриманих операцій перестановок, керованих інформацією. Відповідно, для шифрування m блоків інфор-

мації потрібно $C = m \cdot 384$ операції, що є варіативністю алгоритмів використання.

Наступним кроком буде визначення кількості алгоритмів обробки (K_a) інформації, що визначає довжину пароля, для визначених операцій перестановок, керованих інформацією, що дорівнює

$$K_a = \log_2 C. \quad (1)$$

Виходячи з виразу (1), можна визначити, що кількість алгоритмів обробки для одного блоку інформації дорівнює $K_a = \log_2 384$.

Відповідно, кількість алгоритмів обробки для m блоків інформації буде дорівнювати $K_a = m \cdot \log_2 384 \approx 7 \cdot m$.

Визначимо практичну криптостійкість (R), яка залежить від кількості операцій (K_o), довжини пароля та криптографічного алгоритму, що було використано

$$R = K_a + K_o = m \cdot \log_2 384 + K_o \approx 7 \cdot m \cdot \log_2 K_o.$$

Дослідивши отримані результати, можна зробити висновок, що довжина пароля залежить від довжини інформації при застосуванні випадкового вибору операцій, керованих інформацією. Також можна зазначити, що довжина пароля при виборі операцій під час обробки кожного блоку дорівнює сім бітів.

При такому підході кількість байтів інформації, наприклад, для трирозрядних операцій, що реалізують перестановки, керовані інформацією, можливо збільшити до $7 \cdot m$ разів.

Висновки. Наукова новизна цього дослідження полягає в тому, що вперше здійснено алгоритмізацію методу застосування групи операцій перестановок, керованих інформацією, для криптографічного перетворення інформації текстового файлу та проведено аналіз статистичних властивостей його результатів пакетом NIST STS.

У ході дослідження розроблених алгоритмів, що використовують операції перестановки, керовані інформацією, для криптоперетворення та аналізу їх результатів тестування, отриманих за допомогою пакета NIST STS, було визначено, що найефективнішим серед трьох алгоритмів є алгоритм на основі використання гамування з ключем із заданою кількістю раундів. Оскільки два інші алгоритми мають нижчу оцінку при статистичному тестуванні, застосовувати їх рекомендується разом з іншими алгоритмами криптографічного перетворення, щоб забезпечити необхідну криптографічну стійкість.

Практична реалізація криптографічного алгоритму та, відповідно, і алгоритми та способи застосування досліджуваних операцій перестановок, керованих інформацією, на основі яких будуються методи криптографічного перетворення інформації, напряму залежать від конкретних вимог, які сформульовані та визначені при синтезі систем захисту інформації.

Ефективність використання операцій перестановок, керованих інформацією, для криптографічного перетворення полягає у ре-

алізації методу підвищення швидкості шифрування, сутність якого полягає у використанні послідовності, що гамує, як набору команд виконання послідовностей операцій криптографічного перетворення з використанням цих операцій перестановок. Якщо для шифрування одного блоку даних використовують 384 певні операції перестановок, керованих інформацією, то для m блоків інформації їх необхідно в m разів більше. Саме таким чином забезпечується варіативність алгоритмів, використаних під час криптографічного перетворення.

Список використаних джерел

- [1] Ella Hassanien, and Mohamed Elhoseny, *Cybersecurity and Secure Information Systems: Challenges and Solutions in Smart Environments*. Springer Nature Switzerland AG, 2019.
- [2] V. K. Pachghare, *Cryptography and Information Security*, third ed. PHI Learning Private Limited, 2019.
- [3] Robert Ciesla, *Encryption for Organizations and Individuals*. Apress, Berkeley, CA. HELSINKI, Finland, 2020.
- [4] D. J. Bernstein, "Fast-key-erasure random-number-generators", 2017. [Online]. Available: <https://blog.cr.yp.to/20170723-random.html>.
- [5] А. А. Молдовян, Н. А. Молдовян, и Б. Я. Советов, *Криптография*. Санкт-Петербург, Россия: Лань, 2001.
- [6] Б. Я. Рябко, и А. Н. Фионов, *Основы современной криптографии и стеганографии*. 2-е изд. Москва, Россия: Горячая линия - Телеком, 2013.
- [7] Г. Ф. Конахович, и А. Ю. Пузыренко, *Компьютерная стеганография. Теория и практика*. Киев, Украина: МК-Пресс, 2006.
- [8] В. Г. Бабенко, Н. В. Лада та С. В. Лада, "Синтез і аналіз мікрооперацій для криптографічного перетворення", на *Другій міжнар. наук.-техн. конф. Проблеми інформатизації*: тези доп., Черкаси, 2014, с. 9-10.
- [9] В. Г. Бабенко, та Н. В. Лада, "Синтез і аналіз операцій криптографічного додавання за модулем два", *Системи обробки інформації*, вип. 2 (118), с. 116-118, 2014.
- [10] В. Г. Бабенко, та Н. В. Лада, "Дослідження множини операцій криптографічного

- додавання", на *II Міжнар. наук.-практ. конф. Інформаційні технології в освіті, науці і техніці (ІТОНТ-2014)*: тези доп., Черкаси, 2014, т. 1, с. 135-136.
- [11] В. Г. Бабенко, Н. В. Лада та С. В. Лада, "Аналіз множини операцій, синтезованих на основі додавання за модулем два" на *П'ятій міжнар. наук.-практ. конф. Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації*: тези доп., 2016, с. 54-57.
- [12] В. Г. Бабенко, Н. В. Лада та С. В. Лада, "Дослідження взаємозв'язків між операціями в матричних моделях криптографічного перетворення", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, с. 5-11, 2016.
- [13] О. О. Кузнецов, М. С. Луценко, А. В. Андрушкевич, О. М. Мелкозерова, Д. В. Новікова, та А. В. Лобан, "Статистичні дослідження сучасних поточкових шифрів", *Прикладная радиоэлектроника*, № 3, т. 15, с. 167-178, 2016.
- [14] В. Н. Рудницький, В. Я. Мильчевич, В. Г. Бабенко, Р. П. Мельник, С. В. Рудницький, и О. Г. Мельник, *Криптографическое кодирование: методы и средства реализации*, часть 2. Харьков, Украина: Щедрая усадьба плюс, 2014.
- [15] *Криптографічне кодування: обробка та захист інформації*, під. ред. В. М. Рудницького. Харків, Україна: ДІСА ПЛЮС, 2018.
- [16] Т. В. Миронюк, "Визначення елементарних операцій базової групи перестановок, керованих інформацією", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 100-105, 2016.
- [17] J. Woodage, and D. Shumow, "An analysis of NIST SP 800-90A", in *Advances in Cryptology – EUROCRYPT 2019. Lecture Notes in Computer Science*, Y. Ishai and V. Rijmen, Eds., vol. 11477. Springer, Cham, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-17656-3_6.
- [18] Т. В. Миронюк, та В. Г. Бабенко, "Аналіз статистичних властивостей результатів криптографічного перетворення на основі операцій перестановок, керованих інформацією", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Інноваційні тенденції сьогодення у сфері природничих, гуманітарних та точних наук*: тези доп., 2017, т. 2, с. 41-47.
- [19] Ю. В. Щербина, та С. Л. Волков, "Елементи практичної реалізації частотного тесту генераторів криптографічних перетворень", *Збірник наукових праць ОДАТРА*, вип. 2 (3), с. 17-21, 2013.
- [20] А. В. Потій, С. Ю. Орлова, та Т. А. Гриненко, "Статистичне тестування генераторів випадкових і псевдовипадкових чисел з використанням набору статистичних тестів NIST STS". [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.kiev-security.org.ua.
- [21] A. Rukhin, J. Soto, J. Nechvatal et al., "A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications". [Online]. Available: <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-22-rev1a/SP800-22rev1a.pdf>.
- [22] В. В. Богданов, та Н. А. Паламарчук, "Навчальний комплекс статистичної оцінки псевдовипадкових і текстових послідовностей", *Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*, № 3, с. 17-26, 2007.

References

- [1] Ella Hassanien, and Mohamed Elhoseny, *Cybersecurity and Secure Information Systems: Challenges and Solutions in Smart Environments*. Springer Nature Switzerland AG, 2019.
- [2] V. K. Pachghare, *Cryptography and Information Security*, third ed. PHI Learning Private Limited, 2019.
- [3] Robert Ciesla, *Encryption for Organizations and Individuals*. Apress, Berkeley, CA. HELSINKI, Finland, 2020.
- [4] D. J. Bernstein, "Fast-key-erasure random-number-generators", 2017. [Online]. Available: <https://blog.cr.yp.to/20170723-random.html>.
- [5] A. A. Moldovian, N. A. Moldovian, and B. Ya. Sovetov, *Cryptography*. St. Petersburg, Russia: Lan, 2001 [in Russian].
- [6] B. Ya. Ryabko, and A. N. Fionov, *Foundations of modern cryptography and steganography*, 2nd ed. Moscow, Russia: Goryachaya liniya - Telekom, 2013 [in Russian].
- [7] G. F. Konahovich, and A. Yu. Puzyrenko, *Computer Steganography. Theory and Prac-*

- tice. Kiev, Ukraine: MK-Press, 2006, [in Russian].
- [8] V. H. Babenko, N. V. Lada, and S. V. Lada, "Synthesis and analysis of microoperations for cryptographic transformation", in *2nd Int. Sci.-Pract. Conf. Problems of informatization*. Cherkasy, 2014, pp. 9-10 [in Ukrainian].
- [9] V. H. Babenko, and N. V. Lada, "Synthesis and analysis of cryptographic addition operations modulo two", *Systemy obrobky informatsii*, no. 2 (118), pp. 116-118, 2014 [in Ukrainian].
- [10] V. H. Babenko, and N. V. Lada, "Investigation of many cryptographic addition operations", in *2nd Int. Sci.-Pract. Conf. Information Technologies in Education, Science and Technology (ITONT-2014)*. Cherkasy, 2014, vol. 1, pp. 135-136 [in Ukrainian].
- [11] V. H. Babenko, N. V. Lada, and S. V. Lada, "Analysis of the set of operations synthesized on the basis of addition modulo two", in *5th Int. Sci.-Pract. Conf. Methods and means of coding, protection and consolidation of information*, Vinnytsia, 2016, pp. 54-57 [in Ukrainian].
- [12] V. H. Babenko, N. V. Lada, and S. V. Lada, "Investigation of relationships between operations in matrix models of cryptographic transformation", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologich-nogo universytetu*, no. 1, pp. 5-11, 2016 [in Ukrainian].
- [13] O. O. Kuznetsov, M. S. Lutsenko, A. V. Andrushkevych, O. M. Melkozerova, D. V. Novikova, and A. V. Loban, "Statistical studies of modern stream ciphers", *Prikladnaya radioelektronika*, no. 3, vol. 15, pp. 167-178, 2016 [in Ukrainian].
- [14] V. N. Rudnitskiy, V. Ya. Milchevich, V. G. Babenko, R. P. Melnik, S. V. Rudnitskiy, and O. G. Melnik, *Cryptographic coding: methods and means of implementation*, part 2. Kharkov, Ukraine: Shchedraia usadba plius, 2014 [in Russian].
- [15] *Cryptographic coding: information processing and protection*, V. N. Rudnitskiy, Ed. Kharkiv, Ukraine: DISA PLIUS, 2018 [in Ukrainian].
- [16] T. V. Myroniuk, "Definition of elementary operations of the base group of permutations, controlled by information", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologich-nogo universytetu*, no. 2, pp. 100-105, 2016 [in Ukrainian].
- [17] J. Woodage, and D. Shumow, "An analysis of NIST SP 800-90A", in *Advances in Cryptology – EUROCRYPT 2019. Lecture Notes in Computer Science*, Y. Ishai and V. Rijmen, Eds., vol. 11477. Springer, Cham, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-17656-3_6.
- [18] T. V. Myroniuk, and V. H. Babenko, "Analysis of statistical properties of cryptographic transformation results based on information-driven permutation operations", in *Int. Sci.-Pract. Conf. Innovative Current Trends in the Field of Natural Sciences, Humanities and Exact Sciences*, 2017, vol. 2, pp. 41-47 [in Ukrainian].
- [19] Yu. V. Shcherbyna, and S. L. Volkov, "Elements of practical implementation of frequency test of generators of cryptographic transformations", *Zbirnyk naukovykh prats ODATRIA*, no. 2 (3), pp. 17-21, 2013 [in Ukrainian].
- [20] A. V. Potii, S. Yu. Orlova, and T. A. Hrynenko, "Statistical testing of random and pseudo-random number generators using the NIST STS statistical test suite". [Online]. Available: www.kiev-security.org.ua.
- [21] A. Rukhin, J. Soto, J. Nechvatal et al., "A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications". [Online]. Available: <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-22-rev1a/SP800-22rev1a.pdf>.
- [22] V. V. Bohdanov, and N. A. Palamarchuk, "Educational complex of statistical evaluation of pseudo-random and text sequences", *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu telekomunikatsii ta informatyzatsii Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut"*, no. 3, pp. 17-26, 2007 [in Ukrainian].

V. H. Babenko, *Dr. Tech. Sc., Associate Professor*,

T. V. Myroniuk, *Ph. D., Associate Professor*,

e-mail: t.myroniuk@chdtu.edu.ua

H. V. Kryvovs, *Postgraduate*

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

ALGORITHMS FOR APPLICATION OF PERMUTATION OPERATIONS CONTROLLED BY INFORMATION FOR IMPLEMENTATION OF CRYPTOGRAPHIC TRANSFORMATION OF INFORMATION

The purpose and objectives of the study are to develop the ways to implement cryptographic transformation of information by synthesizing algorithms for permutation operations controlled by information, and to make the analysis of their suitability for use in cryptographic algorithms.

The article provides the use of the basic group of permutation operations controlled by information based on three types of algorithms for implementing the cryptographic transformation: simple shuffling, gamma sequence with a key, gamma sequence with a key with a given number of rounds. Algorithms for application of permutation operations controlled by information for the purpose of applying them in both software and hardware means of cryptographic information protection have been developed. The effectiveness of these algorithms has been evaluated on the basis of their software implementation and statistical testing by the NIST STS test package.

The analysis of statistical portraits of the received results of work of the developed algorithms for the purpose of an estimation of their suitability in the course of construction of cryptographic algorithms is carried out. It is shown that for practical implementation of cryptographic algorithm based on the use of proposed permutation operations controlled by information, it is necessary to determine the practical cryptographic stability of the algorithm, which directly depends on password length and number of operations used to encrypt information. In addition, the calculation of application algorithms variability for cryptographic transformation of several blocks of information is given.

The effectiveness of using permutation operations controlled by information for cryptographic transformation is to implement the method of increasing the encryption rate, the essence of which is to use a gamma sequence as a set of commands to execute sequences of cryptographic transformation operations using these permutation operations.

In the course of studying the developed algorithms for using permutation operations controlled by information for cryptographic transformation and analyzing their testing results obtained with the use of the NIST STS package, it has been determined that the most effective among the three algorithms is the algorithm based on the use of gamma with a key with a given number of rounds. Since the other two algorithms have a lower score in statistical testing, it is recommended to use them together with other cryptographic transformation algorithms in order to provide the necessary cryptographic strength.

Keywords: *permutation, basic operation, discrete model, cryptographic transformation, statistical testing, round, pseudo-random sequence, block diagram of the algorithm.*

УДК 004.023:658.78

[0000-0003-2812-5318] **О. Я. Кучерук**, канд. пед. наук, доцент,
e-mail: kucheruk.o.ya@gmail.com

[0000-0002-0585-5783] **І. В. Драч**, канд. техн. наук, доцент

Хмельницький національний університет
вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, 29016, Україна

ОПТИМІЗАЦІЙНИЙ ПІДХІД В ЗАДАЧІ МАРШРУТИЗАЦІЇ КОМПЛЕКТУВАЛЬНИКА

У статті розглядається задача оптимізації маршруту руху комплектувальника під час комплектації замовлення. Така задача є актуальною, зокрема, для складів на промислових підприємствах. Дослідження проводиться в рамках науково-дослідної роботи 0121U107702 «Моделювання логістичних процесів на складах підприємства» на емпіричних даних складу деталей і комплектуючих ДП КАЗ, що спеціалізується на виготовленні котлів різних модифікацій. Переміщення територією складу є домінуючою складовою процесу комплектації замовлень, на яку припадає понад 50 % загального часу збору замовлення. Тому оптимальний маршрут комплектувальника суттєво впливає на мінімізацію часу та правильне виконання замовлення. В статті запропоновано алгоритм вирішення задачі оптимізації маршруту комплектувальника. Для побудови маршруту руху працівника територією складу пропонується використання евристичних методів, зокрема S-Shape, Midpoint, Return, Combined.

Ключові слова: комплектація замовлень, маршрут, евристика, S-Shape, Midpoint, Return, Combined.

Вступ. В умовах жорсткої конкуренції у промисловому секторі підприємства змушені шукати нові рішення для досягнення значної конкурентної переваги на ринку. Одним із шляхів підвищення ринкової привабливості є поліпшення функціонування всіх процесів. Світовий досвід і сучасні технології управління свідчать, що найбільші резерви підприємства криються саме в оптимізації його бізнес-процесів з метою зниження витрат.

Склад є важливим елементом логістичної системи підприємства. Правильно організоване складське господарство підвищує організованість виробництва і його ритмічність; зберігає якість матеріалів, сировини, продукції; а також покращує використання займаних територій тощо [1]. Складські процеси характеризуються складністю і пов'язані з великими витратами праці та коштів. Тому підприємства постійно шукають нові способи підвищення якості функціонування складу і зменшення витрат на операції всередині складу.

Для промислових підприємств правильне зберігання комплектуючих та їх передача на виробничу лінію є основою ефективного функціонування виробництва. Важливою задачею, яку необхідно вирішити на багатьох підприємствах, є вдосконалення процесу потоку комплектуючих зі складу до виробничої лінії [2].

Важко визначити всі проблеми, з якими щодня стикається склад. Проте досвід показує, що особливою проблемою в складському процесі є пошук і комплектація замовлень як найбільш трудомісткі операції, на які значною мірою впливають маршрут руху комплектувальника під час збору замовлення і спосіб розміщення матеріалів та комплектуючих на складі. Ситуація з пошуком і комплектацією замовлень ускладнюється тим, що ці операції, за небагатьма винятками, виконуються вручну [3]. Тому комплектація замовлень на складах викликає все більший інтерес у підприємств, які, усвідомлюючи величезний потенціал для вдосконалення складських процесів, постійно прагнуть їх оптимізувати.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Експлуатація та управління складами як важливий напрям досліджень є актуальними протягом тривалого часу та залишаються актуальними і сьогодні. Зокрема, багато досліджень було проведено щодо вдосконалення процесу комплектації замовлень, але керування цим процесом залишається складним.

Проблеми оптимізації процесу комплектації розглядали у своїх роботах, зокрема, S. Altarazi, J. Bartholdi, K. Dmytrów; H. Chan, S. Hackman, K. Pang, R. De Koster, T. Le-Duc та K. J. Roodbergen, H. Ratliff і A. Rosenthal,

C. G. Petersen, A. Sabo, M. Garbacz та M. Łopuszyński; G. Tarczyński, E. Коробков.

Зокрема, H. Ratliff і A. Rosenthal розробили точний алгоритм, який дав змогу вирішити проблему руху комплектувальника в одноблочному прямокутному складі. K. J. Roodbergen і R. De Koster узагальнили алгоритм H. Ratliff і A. Rosenthal для випадку складів з двома блоками (три основні коридори).

C. G. Petersen [4] оцінив результати застосування п'яти евристик для побудови маршрутів, а потім порівняв їх із оптимальним алгоритмом H. Ratliff і A. Rosenthal.

У своїй роботі [5] R. De Koster, T. Le-Duc та K. J. Roodbergen описують переваги використання евристичних методів побудови маршруту.

A. Sabo [6] в своїх дослідженнях застосовувала теорію графів, зокрема, використовувались мінімальні обшивні дерева.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності роботи комплектувальника шляхом урахування типу і топології складу та зменшення часових витрат на процес комплектації.

Мета зумовила конкретні завдання, а саме: розглянути можливості оптимізації часових витрат за рахунок раціонального розташування та зберігання товарів на складах; розглянути метод, який дає змогу визначати місця для відвідування, що розташовані як найближче; описати евристики, що використовуються для побудови маршруту комплектувальника; інтегрувати описані методи в алгоритм пошуку оптимального маршруту комплектувальника.

Виклад основного матеріалу. Комплектування замовлень (order picking) – це процес пошуку і вилучення товарів (комплектуючих, матеріалів) з місць зберігання відповідно до конкретного замовлення. Процес комплектування замовлень може досягати за різними оцінками до 55–75 % від усіх трудовитрат на складі. Тому цей процес є пріоритетним напрямом поліпшення ефективності функціонування складу [7, 8, 9].

Відомі дві схеми комплектації [10]: «людина до товару» і «товар до людини». Система «товар до людини» рентабельна тільки при повній автоматизації процесів розміщення та збору товарів. Тому більшість складів надають перевагу системі «людина до товару», в якій працівник складу, рухаючись

уздовж проходів, здійснює збір товару згідно з замовленням. У схемі «людина до товару» процес комплектації включає: переміщення по складу, пошук товарів, вилучення товарів із місць зберігання та організаційні заходи. Отже, час, що становить загальний час збору замовлення, можна поділити на три типи: час у дорозі (переміщення по складу); час обробки замовлення – пошук місць зберігання та вилучення предметів; адміністративний час – час на організаційні заходи. Переміщення по складу є домінуючою складовою, на яку припадає понад 50 % загального часу збору замовлення (рисунки 1).

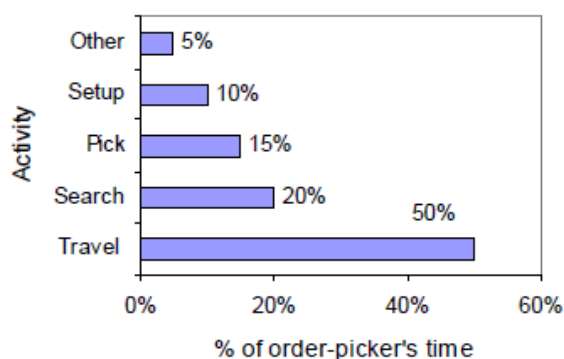


Рисунок 1 – Типовий розподіл часу комплектувальника (за [5])

За словами Bartholdi і Hackman, «час у дорозі є марнотратним. Це коштує робочих годин, але не додає вартості» [8]. Тому оптимізація цього елемента є надзвичайно важливою. Місця розташування товарів також мають значний вплив на форму маршруту та його довжину [11]. Основне завдання полягає в організації процесу таким чином, щоб скоротити маршрут комплектувальника при обході місць зберігання товару і виключити зайві переміщення. Отже, проблема потребує вирішення двох задач: визначення набору місць зберігання, які треба відвідати, та мінімізація відстані, що проходить комплектувальник.

Перш ніж будувати маршрут, який повинен пройти комплектувальник, необхідно визначити місця, які треба відвідати (опорні точки для побудови маршруту). А це залежить від способу зберігання. Є два основні способи зберігання: спеціальне зберігання (*dedicated storage*) і спільне зберігання (*shared storage*). При спеціальному зберіганні певний товар зберігається лише в одному місці, інакше кажучи, вказане місце призначається лише для зберігання певного товару. У разі спільного

зберігання певний товар теоретично може зберігатися в декількох місцях. Спільне зберігання забезпечує набагато краще використання простору для зберігання, але товар у цьому разі «розсіюється по складу» [12, 13]. У разі спільного зберігання необхідно визначити, з якого місця брати товар (якщо він зберігається в більш ніж одному місці).

Зменшити «розсіювання по складу» можливо, використовуючи методи, що дають можливість класифікувати та раціонально розташувати товари. Одним із таких методів, який найчастіше використовується, є ABC-аналіз. Цей метод базується на принципі Парето (80/20), згідно з яким 20 % причин мають 80 % наслідків [14]. Застосовуючи його до складу, можна зробити висновок, що 20 % товарних позицій генерують 80 % товарних потоків, тоді як 80 % видів товарів припадає на решту 20 % потоків. ABC-аналіз дає змогу поділити весь асортимент товару на три групи за певним критерієм. При комплектуванні замовлень таким критерієм зручно обирати частоту появи певного товару у листі замовлення. В такому разі:

група А – товари з найбільшою частотою взяття, тобто товари, що найчастіше з'являються у листах замовлень (товари, що становлять 20 % від загальної кількості товарів, але становлять близько 80 % від усього обороту);

група В – товари з середньою частотою взяття (товари, що становлять 15 % від усього обороту)

група С – товари з найменшою частотою взяття (товари, що становлять 5 % від усього обороту) (рисунк 2).



Рисунок 2 – Ілюстрація ABC-аналізу [15]

Щоб зменшити довжину маршруту, важливо всі місця зберігання розділити на асор-

тиментні зони А, В, С. Таким чином, набір місць зберігання ділиться на підмножини. Товари групи А, які найчастіше з'являються в листах замовлень, розташовуються в найближчій відстані до пункту видачі (початку маршруту). Товари групи В зберігаються в середній зоні, а групи С – у найбільш віддаленій зоні (рисунк 3).

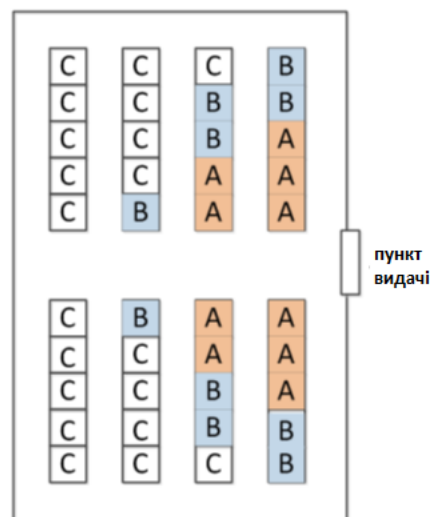


Рисунок 3 – Приклад розташування товарів на основі ABC-аналізу ([10])

Для оптимізації маршруту також важливо, щоб місця, які необхідно відвідати під час комплектації замовлення, були максимально наближені один до одного. Особливо це важливо за умови спільного зберігання. Для визначення місць, які треба відвідати комплектувальнику, зручно використовувати метод таксономічної міри привабливості місцеположення (TMAL – Taksonomiczna Miara Atrakcyjności Lokalizacji), запропонований К. Dmytrów [12]. Цей метод дає змогу визначити місця для відвідування (опорні точки), що розташовані максимально близько і дають можливість збору більшої частини замовлення. Для знаходження значення показника TMAL використовуються такі характеристики: відстань від початку маршруту до опорної точки, рівень виконання замовлення за певною асортиментною позицією в певній опорній точці та кількість інших товарних позицій у списку замовлень, які знаходяться в цьому місці або в його безпосередній близькості. Причиною використання цього методу є, по-перше, його обчислювальна простота, висока гнучкість і простота реалізації; по-друге, можливість модифікації та використання інших

характеристик. Використання цього методу було розглянуто нами у роботі [13]. Після визначення місць для відвідування будується маршрут руху комплектувальника.

Задачу оптимізації маршруту комплектувальника під час комплектації замовлення можна розглядати як проблему комівояжера. Н. D. Ratliff і A. S. Rosenthal у 1983 р., використовуючи теорію графів та динамічне програмування, розробили точний алгоритм, який дав змогу вирішити цю задачу для одноблочного прямокутного складу. Цей алгоритм забезпечує знаходження оптимального рішення на складах з будь-якою кількістю паралельних алеї та двома головними проходами. K. J. Roodbergen і R. De Koster пізніше узагальнили алгоритм Н. D. Ratliff і A. S. Rosenthal для випадку складів із двома блоками (трьома основними коридорами). Для інших типів складів пошук найкоротшого шляху є більш складним і трудомістким завданням [16].

На практиці проблема маршрутизації комплектувальника замовлень на складі в основному вирішується за допомогою евристик. Це пов'язано з деякими недоліками застосування оптимальної маршрутизації на практиці. По-перше, варто зазначити, що оптимальний алгоритм доступний не для кожного макету складу. По-друге, оптимальні маршрути можуть здатися нелогічними для працівників, що здійснюють комплектацію замовлень, які в результаті відхиляються від зазначених маршрутів. По-третє, стандартний оптимальний алгоритм не може враховувати можливе виникнення заторів у проходах [5].

Евристичні методи дають змогу досягти рішень, близьких до оптимальних, і додатково дають можливість уникнути зіткнень і заторів, які можуть виникнути під час одночасної роботи багатьох працівників складу, і від яких оптимальний алгоритм не захищає. Існує декілька евристичних методів: S-Shape, Midpoint, Return, Largest gap, Combined.

Метод S-Shape (рисунк 4) є одним із найпопулярніших і найпростіших методів визначення маршруту. Згідно з цим методом комплектувальник під час збору замовлення переміщується маршрутом, що нагадує букву S. Працівник починає виконувати замовлення в початковому пункті, де він одержує замовлення. Потім звертає до найближчої алеї, в якій є місця зберігання, які необхідно відвідати. Зібравши всі товари в цій алеї, працівник

прямує до її кінця і переходить у бічний коридор, щоб увійти до наступної алеї. Відвідуються лише алеї, що містять принаймні одне місце зберігання, яке необхідно відвідати, і проходиться вся їх довжина (без можливості повернення) [2, 17].

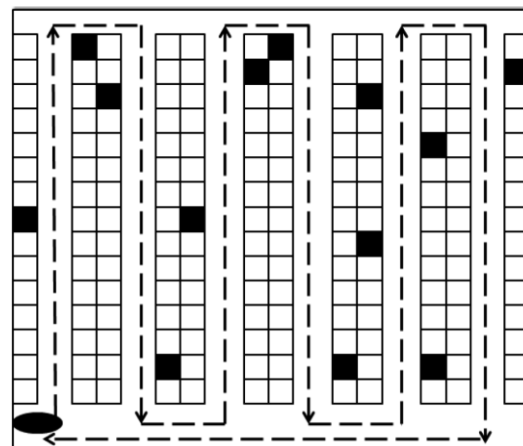


Рисунок 4 – Метод S-Shape [17]

При використанні методу Midpoint (рисунк 5) склад умовно ділиться навпіл. Виконуючи замовлення, комплектувальник входить у першу алею, на якій містяться товари, що підлягають збору, але відвідує лише ті місця зберігання, що знаходяться до умовної лінії поділу складу. Досягнувши цієї лінії, працівник повертається до головного проходу та прямує до наступної алеї, де є місця зберігання, які необхідно відвідати, та проходить її аналогічно. Остання алея проходиться повністю [2].

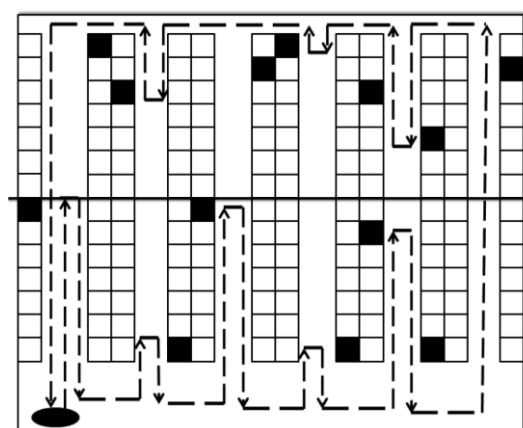


Рисунок 5 – Метод Midpoint [16]

Метод Return (рисунк 6) передбачає відвідування кожної з алеї, в якій є місця, необхідні для відвідування. Заходячи на певну алею, працівник проходить так глибоко,

щоб відвідати всі визначені на цій алеї місця зберігання, а потім повертається в головний прохід [2].

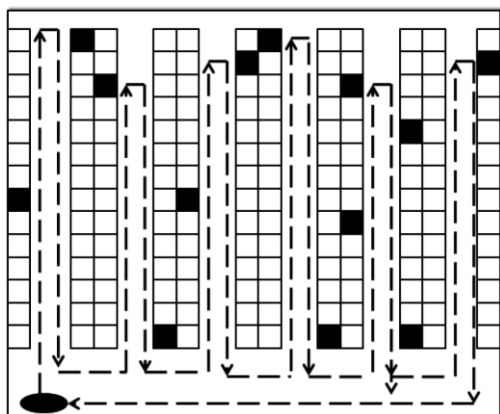


Рисунок 6 – Метод Return [17]

Маршрут, визначений за допомогою методу Largest gap (рисунок 7), часто подібний до маршруту, отриманого методом Midpoint, оскільки обидва методи базуються на подібних засадах: ділення складу на дві частини та комплектування товару спочатку з однієї і лише потім з другої частини. На відміну від методу Midpoint, тут працівник, заходячи на окремі алеї, може зайти за їх середню уявну межу [17].

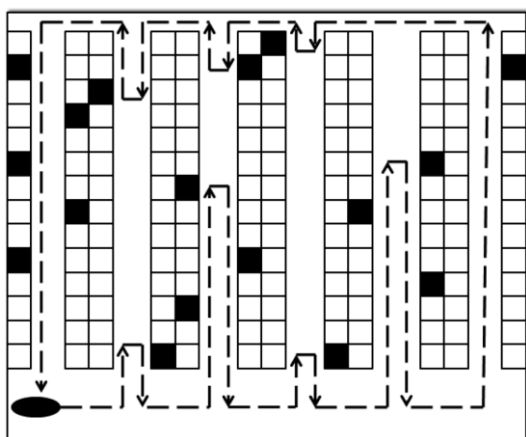


Рисунок 7 – Метод Largest gap [17]

Метод Combined (рисунок 8) передбачає, що працівник під час збору відвідує алеї, де є місця, необхідні для відвідування, після чого вирішує, чи повертатися в нижній головний прохід, чи рухатися у верхній. Вибирається більш сприятливий варіант [17].

Кожен з описаних методів визначення маршруту збору може знайти своє застосування на різних складах підприємств. Вира-

ти, який найкращий для певного, можна шляхом проведення відповідних випробувань, що дадуть змогу перевірити, який із методів за певних умов приведе до найкоротшої тривалості процесу збору замовлення.

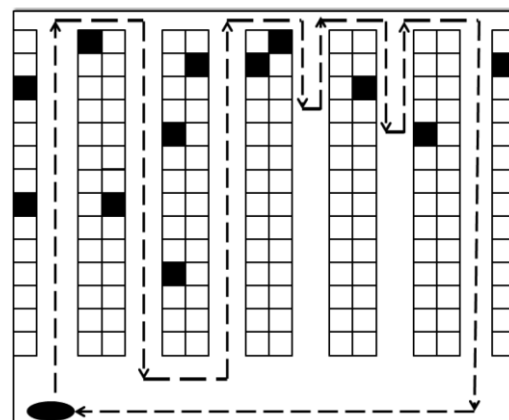


Рисунок 8 – Метод Combined [17]

З огляду на зазначене вище, пропонується такий алгоритм рішення задачі оптимізації маршруту комплектувальника.

Етап 1: Проведення ABC-аналізу для визначення відповідного розташування деталей та комплектуючих на складі.

Етап 2: Застосування методу таксономічної міри привабливості місцеположення (TMAL) для визначення місць, які необхідно відвідати комплектувальнику згідно з замовленням.

Етап 3: Побудова маршруту руху комплектувальника за допомогою кількох евристичних методів (зокрема, S-Shape, Midpoint, Return, Combined).

Етап 4: Вибір найкращої евристики для певних типу та топології досліджуваного складу за критерієм мінімуму середньої довжини маршруту.

Результати дослідження. Предметом аналізу є склад деталей та комплектуючих на підприємстві. Навіть незначні помилки та затримки доставки деталей та комплектуючих можуть призвести до зупинки виробничої лінії, що, в свою чергу, негативно впливає на весь виробничий процес. Працівник складу починає процес комплектування у початковій точці (пункт отримання замовлення), переміщується складом і вилучає деталі та комплектуючі з визначених місць зберігання відповідно до списку замовлення. Після завершення збору замовлення працівник повертається до

початкової точки. На цьому складі використується спосіб спільного зберігання.

Відповідно до першого етапу алгоритму на складі комплектуючих підприємства було проведено ABC-аналіз, який здійснювався з

використанням мови функцій та формул DAX. Перелік товарних найменувань містить понад 190 позицій. На рисунку 9 зображено фрагмент таблиці з результатами поділу асортиментних позицій на класи.

Product Name	Demand for product	Cumulated demand	Cumulated Pct	ABC Class
Упаковка	263	3%	55,92%	A
Заглушка	261	3%	58,82%	A
Етикетка-4	257	3%	61,67%	A
Димохід	257	3%	64,53%	A
Заклепка	241	3%	67,20%	A
Гвинт	180	2%	69,20%	A
Корпус	100	1%	70,00%	A
Заглушка	59	1%	70,97%	B
Брусok	59	1%	71,62%	B
Зольник	59	1%	72,28%	B
Болт 4	58	1%	72,92%	B

Рисунок 9 – Фрагмент таблиці з результатами проведення ABC-аналізу

За результатами ABC-аналізу на складі підприємства було розміщено всі деталі та комплектуючі на полицях стелажів, які поділені на слоти (комірки). Зауважимо, що цей етап не потребує повторення при побудові маршрутів для різних замовлень. Його можна періодично проводити, за умови змін у переліку товарних найменувань.

Для наступних етапів у ході дослідження створено веб-додаток мовою «Typescript», для розробки якого обрано фреймворк «Angular».

Для кожного найменування в листі замовлення розраховується інтегральний показник таксономічної міри привабливості його місцеположення, який залежить від: віддаленості елемента замовлення від пункту одержання та видачі замовлення; частки виконання елемента замовлення в певному слоті; кількості інших елементів у списку замовлень, які знаходяться в цьому слоті або в його околі. Детально процес визначення інтегрального показника таксономічної міри привабливості місцеположення елементів замовлення розглянуто в роботі [13]. Для подальшого дослідження обираються слоти з найвищим інтегральним показником.

Так, за емпіричними даними підприємства визначено 15 типових замовлень – наближено однакового обсягу, проте різних за набором елементів. Для кожного з цих замовлень у веб-додатку за методом таксономічної міри привабливості місцеположення визначе-

но опорні точки, які необхідно відвідати комплектувальнику, та побудовано маршрути руху за допомогою методів S-Shape, Midpoint, Return, Combined.

До прикладу, рисунок 10 ілюструє побудовані маршрути для одного із замовлень методами S-Shape та Return.

Для порівняння побудованих маршрутів обчислено довжину кожного маршруту у метрах. Результати досліджень подано у таблиці 1.

За найменшим значенням усередненого показника довжини маршруту найкращим методом побудови оптимального маршруту комплектувальника для заданих параметрів геометрії та топології складу є S-Shape.

Обговорення результатів. Застосування ABC-аналізу дало можливість оптимізувати розташування деталей та комплектуючих на складі, розташували ті асортиментні позиції, що мають вищий попит, ближче до пункту отримання та видачі замовлення. Використання методу таксономічної міри привабливості місцеположення дає змогу оптимізувати набір опорних точок маршруту, а застосування евристик – його побудувати.

Результати випробувань свідчать, що для досліджуваного складу найкращими методами для побудови маршруту комплектувальника виявилися метод S-Shape та метод Combined. Проте, як видно з таблиці 1, метод S-Shape все ж дає кращі результати.



Рисунок 10 – Маршрути руху з використанням: а) S-Shape; б) Return методів

Таблиця 1 – Результати досліджень (довжина маршруту)

№ замовлення	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Середня довжина маршруту
S-Shape	54	64	59	62	61	58	59	65	75	59	57	59	67	72	61	62,13
Midpoint	74	76	82	85	73	69	71	77	84	89	72	77	74	70	88	77,4
Return	78	63	86	72	73	80	89	91	72	78	92	67	84	93	83	80,07
Combined	62	61	63	73	71	68	70	71	59	63	73	62	72	59	59	65,73

Висновки. У статті розглянуто комплекс методів для розв'язання задачі маршрутизації і запропоновано алгоритм розв'язання задачі побудови оптимального маршруту комплектувальника, що дає можливість частково скоротити час комплектації замовлення. Значну увагу приділено евристичним методам побудови маршруту. Однозначно обрати найкращий метод визначення маршруту неможливо, оскільки цей вибір залежить від індивідуальних характеристик складу: розмірів, розташування стелажів, способу зберігання. Для складу, на якому проводилось дослідження, найкращим методом виявився метод S-Shape.

Задача побудови маршруту руху комплектувальника розглядалася й у роботах інших науковців. Проте всі відомі дослідження розглядали склади з будь-якою кількістю паралельних алей та декількома головними проходами, що перпендикулярні алеям.

Новизною нашого дослідження є розгляд іншої топології складу, а саме топології, де наявні проходи, що розташовані під певним кутом до алей. Науково-практичне значення дослідження полягає в поєднанні так-

сономічної міри привабливості місцеположення елементів замовлення та евристичних підходів до побудови маршруту руху комплектувальника для зазначеної топології складу.

Таким чином, запропонований алгоритм дає можливість покращити ефективність одного з процесів у складській логістичній системі, враховуючи тип і типологію складу та не вимагаючи значних додаткових витрат. Алгоритм дає змогу побудувати коротший шлях руху комплектувальника, проте доцільно розглянути і час, що витрачається на процес комплектування. Довжина маршруту описує лише переміщення, але не враховує часові витрати на відбір деталей в опорних точках, які залежать від кількості деталей, що необхідно взяти в опорній точці, та їх розташування на полицях стелажів. На це і будуть спрямовані подальші дослідження.

Дослідження виконано в рамках науково-дослідної роботи 0121U107702 «Моделювання логістичних процесів на складах підприємства». Валідація запропонованого алгоритму здійснювалася на даних підприємства «Красилівський агрегатний завод».

Список використаних джерел

- [1] А. Я. Кибанов, и Д. К. Захаров, *Формирование системы управления*. Москва, Россия: ГАУ, 2015.
- [2] M. Szada-Borzyszkowska, i W. Szada-Borzyszkowski, "Usprawnienie trasy kompletacji zamówienia w magazynie części do montażu pojazdów samochodowych", *Autobusy*, № 7-8, s. 271-274, 2017.
- [3] S. A. Altarazi, and M. M. Ammouri, "Concurrent manual-order-picking warehouse design: a simulation-based design of experiments approach", *International Journal of Production Research*, pp. 1-19, 2017.
- [4] C. G. Petersen, and G. R. Aase, "A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking", *International Journal of Production Economics*, № 92, pp. 11-19, 2004.
- [5] R. De Koster, T. Le-Duc, and K. J. Roodbergen, "Design and control of warehouse order picking: A literature review", *European Journal of Operational Research*, № 182 (2), pp. 481-501, 2007.
- [6] A. Sabo, "Analiza problemu kompletacji zamówień w magazynie wysokiego składowania", *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach*, s. 103-121, 2013.
- [7] Е. В. Коробков, "Процесс комплектования заказов на складе. Обзор", *Наука и Образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана*, № 3, с. 153-183, 2015.
- [8] J. J. Bartholdi, and S. T. Hackman, *Warehouse & Distribution science Release 0.94*, 2011.
- [9] Wenrong Lua, Duncan McFarlanea, Vaggelis Giannikasa, and Quan Zhangb, "An algorithm for dynamic order-picking in warehouse operations", *Preprint submitted to European Journal of Operational Research*, May 19, pp. 1-36, 2015.
- [10] I. Kudelska, "Metoda wyboru zmiennych miejsc składowania w magazynie", *Rozprawa doktorska*, Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Zarządzania, Poznań, 2016.
- [11] T. Bódis, J. Botzheim, and P. Földesi, "Necessity and complexity of order picking routing optimisation based on pallet loading features", *Acta Univ. Sapientiae, Informatica*, 9, pp. 162-194, 2017.
- [12] Krzysztof Dmytrów, "Uwzględnianie czasu pobrań w wyborze lokalizacji odwiedzanych przez magazyniera pod czas kompletacji produktów", *Studia i Prace WNEiZ US*, № 44/2, s. 229-239, 2016.
- [13] О. Я. Кучерук, та О. І. Злотаренчук, "Таксономічна міра привабливості місцеположення в оптимізації процесу комплектації замовлень", *Проблеми системного підходу в економіці*, вип. 5 (79), с. 148-153, 2020.
- [14] "Zalety stosowania analizy ABC do klasyfikacji zapasów w magazynie". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mecalux.pl/blog/analiza-abc-klasyfikacja-magazynie>. Дата звернення: Верес. 5, 2021.
- [15] Analiza ABC XYZ. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://staworzynski.com/artikuly/analiza-abc-xyz/>. Дата звернення: Верес. 6, 2021.
- [16] G. Tarczyński, "Porównanie efektywności kompletacji łączonych zleceń z kompletacją niezależną", *Prace naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, № 446, s. 250-263, 2016.
- [17] A. Sabo-Zielonka, i G. Tarczyński, "Porównanie czasów kompletacji zamówień dla różnych sposobów wyznaczania trasy magazynierów na przykładzie dużego centrum logistycznego", *Ekonometria*, № 2 (44), s. 62-81, 2014.

References

- [1] A. Ya. Kibanov, and D. K. Zakharov, *Formation of a management system*. Moscow, Russia: GAU, 2015 [in Russian].
- [2] M. Szada-Borzyszkowska, and W. Szada-Borzyszkowski, "Streamlining the order picking route in the automotive parts warehouse", *Autobusy*, no. 7-8, pp. 271-274, 2017.
- [3] S. A. Altarazi, and M. M. Ammouri, "Concurrent manual-order-picking warehouse design: a simulation-based design of experiments approach", *International Journal of Production Research*, pp. 1-19, 2017.
- [4] C. G. Petersen, and G. R. Aase, "A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking", *International Journal of Production Economics*, no. 92, pp. 11-19, 2004.

- [5] R. De Koster, T. Le-Duc, and K. J. Roodbergen, "Design and control of warehouse order picking: A literature review", *European Journal of Operational Research*, no. 182 (2), pp. 481-501, 2007.
- [6] A. Sabo, "Analysis of the problem of order picking in a high-bay warehouse", *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach*, pp. 103-121, 2013.
- [7] Ye. V. Korobkov, "The process of completing orders in the warehouse. Review", *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N. E. Bauman*, no. 3, pp. 153-183, 2015 [in Russian].
- [8] J. J. Bartholdi, and S. T. Hackman, *Warehouse & Distribution science Release 0.94*, 2011.
- [9] Wenrong Lua, Duncan McFarlanea, Vaggelis Giannikasa, and Quan Zhangb, "An algorithm for dynamic order-picking in warehouse operations", *Preprint submitted to European Journal of Operational Research*, May 19, pp. 1-36, 2015.
- [10] I. Kudelska, "Method of selecting variable storage locations in a warehouse", *Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Zarządzania, Poznań*, 2016.
- [11] T. Bódis, J. Botzheim, and P. Földesi, "Necessity and complexity of order picking routing optimisation based on pallet loading features", *Acta Univ. Sapientiae, Informatica*, 9, pp. 162-194, 2017.
- [12] Krzysztof Dmytrów, "Taking into account the time of picking in the selection of locations visited by the warehouseman during the completion of products", *Studia i Prace WNEiZ US*, no. 44/2, pp. 229-239, 2016.
- [13] O. Ja. Kucheruk, and O. I. Zlotarenchuk, "Taxonomic measure of the attractiveness of the location in the optimization of the process of completing orders", *Problemy systemnoho pidkhodu v ekonomici*, iss. 5 (79), pp. 148-153, 2020 [in Russian].
- [14] "Advantages of using ABC analysis to classify inventory in a warehouse". [Online]. Available: <https://www.mecalux.pl/blog/analiza-abc-klasyfikacja-magazynie>. Accessed on: Sept. 5, 2021.
- [15] Analiza ABC XYZ. [Online]. Available: <https://staworzynski.com/artykuly/analiza-abc-xyz/>. Accessed on: Sept. 6, 2021.
- [16] G. Tarczyński, "Comparison of the effectiveness of picking combined orders with independent picking", *Prace naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, no. 446, pp. 250-263, 2016.
- [17] A. Sabo-Zielonka, and G. Tarczyński, "Comparison of order picking times for different ways of mapping the warehouse routes on the example of a large logistics center", *Ekonometria*, no. 2 (44), pp. 62-81, 2014.

O. Ya. Kucheruk, Ph. D., Associate Professor,
e-mail: kucheruk.o.ya@gmail.com

I. V. Drach, Ph. D., Associate Professor
Khmelnitsky National University
Instytutska st., 11, Khmelnitsky, 29016, Ukraine

OPTIMIZATION APPROACH IN THE ROUTING PROBLEM

The article considers that the warehouse is a particularly important element of the logistics system of the enterprise. Properly organized warehousing increases the organization of production and its rhythm; preserves the quality of materials, raw materials, products; as well as improves the use of occupied territories, etc. The main operations carried out in each warehouse are the receipt, storage, assembly and delivery of goods.

The authors emphasize that a special problem in the warehousing process is the search and execution of orders as the most time-consuming operations. These processes include moving according to the search for goods, withdrawal of goods according to organizational inputs. Moving through the warehouse is the dominant component of the order picking process, which accounts for more than 50 % of the total order collection time. Therefore, the optimal route can simultaneously minimize time and correct the fulfillment of the order. The main task is to organize the process so as to reduce the route of the picker when bypassing the storage of goods and eliminate unnecessary movement. Thus,

the problem needs to be solved by two tasks: determining the set of storage sites to be visited, and minimizing the distance traveled by the picker.

The article considers a set of methods for solving the routing problem and proposes an algorithm for solving the problem of the optimization of the route of the picker, which allows to partially reduce the time of completion of the order. The scientific and practical significance of the study is to combine the taxonomic degree of attractiveness of the location of the elements of the order and heuristic approaches to the construction of the route of movement of the picker for the specified topology of the warehouse. Considerable attention is paid to heuristic methods of route construction. It is impossible to unambiguously choose the best method of determining the route, as this choice depends on the individual characteristics of the composition: size, location of racks, method of storage. Thus, the proposed algorithm makes it possible to improve the efficiency of one of the processes in the warehousing logistics system, taking into account the type and typology of the warehouse and without requiring significant additional costs. The algorithm allows to construct a shorter path of the picker, but it is advisable to consider the time spent on the picking process.

The study has been conducted as a part of research work "Modeling of logical processes in warehouses of the enterprise" in warehouses of parts and components of enterprises, specializing in the preparation of boilers of various modifications. Four heuristic methods are used to determine the employee's route, namely S-Shape, Midpoint, Return, Combined.

Keywords: *order picking, route, heuristics, S-Shape, Midpoint, Return, Combined.*

УДК 629.113

[0000-0002-9300-8911]

С. В. Ромашко,*завідувач сектору автотехнічних досліджень,*

[0000-0001-7019-0602]

В. Б. Харенко,*судовий експерт сектору автотехнічних досліджень*

Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України

вул. Пастерівська, 104, м. Черкаси, 18009, Україна

[0000-0002-5881-9217]

М. В. Підгорний, *канд. техн. наук, доцент,**декан факультету комп'ютеризованих технологій машинобудування і дизайну,*

[0000-0002-8640-879X]

В. В. Литовченко, *аспірант*

Черкаський державний технологічний університет

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

МОДЕЛІ РУХУ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ПРИ ПОЗДОВЖНІХ ЗІТКНЕННЯХ

Зіткнення транспортних засобів є найбільш небезпечним видом дорожньо-транспортної пригоди (ДТП) за кількістю жертв і розмірами матеріальних збитків. При розслідуванні ДТП, пов'язаних із поздовжніми зіткненнями, виникає необхідність встановлення механізму дорожньо-транспортної пригоди для повного та всебічного розслідування, а також для виконання об'єктивного висновку експерта. Цю можливість надають дослідження моделей руху автотранспортних засобів. У статті запропоновано підходи для удосконалення методу автотехнічної експертизи при поздовжніх зіткненнях.

Ключові слова: автомобіль, ДТП, дослідження, судова експертиза, автотехнічна експертиза.

Вступ. Зі збільшенням автомобільного руху зростає кількість дорожньо-транспортних пригод. Практика розслідування дорожньо-транспортних пригод (ДТП) свідчить, що в зв'язку зі складністю цієї категорії кримінальних справ висновки автотехнічної експертизи є джерелом доказів, який сьогодні ґрунтується на використанні інформаційних технологій НДЕКЦ та технічних засобів (ТЗ) [1].

Причини, що призвели до виникнення ДТП, – це результат порушення учасниками дорожнього руху правил безпеки руху, що створюють цілісну систему. У процесі зіткнень транспортні засоби, водії і пасажери піддаються дії механічних навантажень, які діють протягом нетривалого проміжку часу, але вплив таких навантажень має значний негативний характер [1].

Класифікація видів зіткнень транспортних засобів, наведена в роботі [1], відповідає потребам автотехнічної експертизи, покликана стати підґрунтям формування методології експертного дослідження обставин, що визначають механізм зіткнення ТЗ. Низка дослідни-

ків класифікували види зіткнень транспортних засобів. Ця класифікація подана в роботах дослідників В. А. Іларіонова [3]; Ю. Г. Корухова [6]; С. А. Євтюкова, Я. В. Васильєва [7]; Е. Р. Домке [1]; Ю. Б. Суворова [8]; Kenneth R. Agent та Jerry G. Pigman [10], Н. Ward Smith [11] та В. В. Столярова [14].

Представлене дослідження є продовженням [1], і, на відміну від попереднього, досліджуються моделі поздовжніх зіткнень автотранспортних засобів.

Метою статті є моделювання механізму поздовжнього зіткнення ТЗ і аналіз (дослідження) особливостей їх руху для встановлення характеристик динаміки цього процесу при зіткненнях, що необхідно для вдосконалення методів з'ясування обставин ДТП при поздовжніх зіткненнях.

Виклад основного матеріалу. В процесі автотехнічної експертизи при дослідженні зіткнень актуальним є вироблення технології (з доббором сучасного інструментарію) для встановлення механізму дорожньо-транспортної пригоди [1]. ДТП фіксується схемою пригоди, що дозволяє встановити

взаємне розташування автомобілів після скоєння зіткнення. Не завжди відомі їхні кінематичні характеристики, що передують ДТП, це може призвести до колізії при виконанні експертизи. У зв'язку з цим виникає необхідність відновлення характеристик руху учасників ДТП. Модель механізму розвитку ДТП, як правило, оцінюється на основі різних експертиз або проведення натурного моделювання. Такий підхід дозволяє дати тільки якісну оцінку ДТП, далеку від об'єктивності. Тому постає завдання формування математичної моделі, що враховує особливості руху автомобіля як динамічної системи, а також особливості непружного зіткнення автомобілів, враховуючи їх динамічні характеристики.

Для встановлення механізму зіткнення ТЗ необхідно визначити місце дорожньо-транспортної пригоди та взаємне розташування транспортних засобів у момент зіткнення, швидкості транспортних засобів перед зіткненням, розташування на смузі руху [5]. Методика експертного дослідження для встановлення механізму зіткнення залежить від виду зіткнення, що визначається його характером: дотичне, ковзаюче, блокуюче.

Принцип моделювання ДТП полягає в тому, що складна логіко-динамічна система (ДТП) представляється скінченною множиною моделей, які дають можливість дослідити окремі властивості системи або ДТП в цілому. В роботах [1, 13, 16] показано, що реалізація цього принципу в процесі створення ІТ в галузі автомобільного транспорту дає змогу на етапах НДР та проектування ЖЦ ІТ отримати предметно-орієнтовані моделі об'єктів, процесів та їх властивостей, а також дослідити їх поведінку функціонування в реальному фізичному середовищі.

Поздовжні зіткнення поділяють на зустрічне та попутне [12].

Зустрічне зіткнення – це зіткнення, при якому проекція вектора швидкості першого ТЗ на напрямок швидкості іншого ТЗ протилежна цьому напрямку. Транспортні засоби зближувались назустріч один одному з відхиленням (кут $\alpha^1 > 90^\circ$, $< 270^\circ$).

Попутне зіткнення – проекція вектора швидкості одного з ТЗ на напрямок швидкості іншого збігається з цим напрямком. ТЗ зближувались, зміщувались з відхиленням в одному напрямку (кут $\alpha^1 < 90^\circ$, $> 270^\circ$).

На рисунках 1, 2 зображено схеми зустрічного та попутного зіткнення двох транспортних засобів.

У дорожньо-транспортних пригодах під час поздовжніх зіткнень транспортні засоби здійснюють складні переміщення один відносно одного та іноді роз'їжджаються від місця пригоди. Робота, що здійснюється в процесі зіткнення транспортних засобів, визначається сумою робіт обертального і поступального рухів.

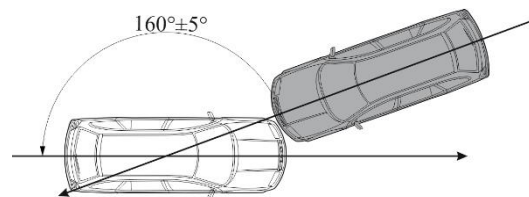


Рисунок 1 – Схема зустрічного зіткнення (подано схему, кут між поздовжніми осями транспортних засобів становить $160^\circ \pm 5^\circ$)

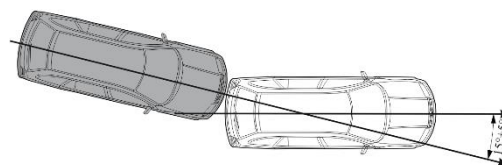
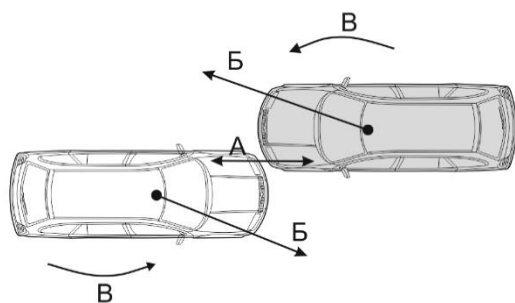


Рисунок 2 – Схема попутного зіткнення (схема транспортно-трасологічної експертизи, кут між поздовжніми осями транспортних засобів становить $15^\circ \pm 5^\circ$)

Пряма, що проходить через точку зіткнення автомобілів, спрямована паралельно відносній швидкості їх центрів мас на початковій стадії зіткнення, називається лінією удару. Це визначення має істотне значення [1], адже саме по цій лінії діє ударний імпульс при зіткненні транспортних засобів.

Залежно від того, як проходить лінія удару, розрізняються види зіткнень. Зіткнення називається центральним, якщо лінія удару проходить через центри маси транспортного засобу, в іншому випадку воно ексцентричне. Потрібно враховувати, що напрям лінії удару при зіткненні транспортних засобів залежить як від напрямку руху, так і від величини швидкості руху кожного з них. У разі, коли швидкості руху автомобілів відмінні, то лінія удару буде розташована під кутом, меншим до поздовжньої осі того з транспортних засобів, який перед зіткненням мав більшу швидкість [4] (рисунок 3).



А – лінія зіткнення;

Б – вказаний напрям переміщення після зіткнення;

В – вказаний напрям обертання автомобілів після удару

Рисунок 3 – Лінія зіткнення і передбачуваний напрям переміщення автомобілів після зіткнення

Як відомо, попутне зіткнення є одним із основних видів зіткнень, що відбуваються на дорозі. В цьому випадку обидва автотранспортні засоби рухаються одним напрямком або автомобіль, що знаходиться попереду, зупинився. Винятком є: автомобіль, що знаходиться попереду, може заднім ходом зіткнутися із заднім автомобілем, але подібні аварії трапляються досить рідко і вимагають серйозного вивчення. Місце зіткнення може бути визначене залишками скла задніх ліхтарів автомобіля (які залишаються на дорозі в місці зіткнення), що зупинився, або за місцем, де сліди ковзання ТЗ раптово відхиляються убік. Таке відхилення пояснюється тим, що автомобіль при зіткненні зазнає коливань [15].

При попутному зіткненні під час руху обох автомобілів по автомобільній смузі автомобілі можуть зупинитися в зчепленому стані або відскочити один від одного. Якщо передній автомобіль стояв або рухався з меншою швидкістю, то швидкість заднього автомобіля може бути визначена методом, запропонованим нижче.

Водночас застосовується основний принцип: збільшення в рівняннях залежностей кількості параметрів, що враховують вплив характерних для цього випадку умов.

Таким чином, при зіткненні двох ТЗ добуток їх маси на швидкість залишаються постійними до і після ДТП. Стосовно автомобілів можна замінити масу їх вагою, і тоді випливає, що добуток ваги на швидкість не змінюється при зіткненні автомобілів. Сумарна кількість

руху двох автомобілів перед зіткненням буде дорівнювати

$$W_1 v_1 + W_2 v_2,$$

де v_1 – швидкість автомобіля № 1;

v_2 – швидкість автомобіля № 2;

W_1 – маса ТЗ № 1;

W_2 – маса ТЗ № 2.

Закон збереження кількості руху свідчить про таке: якщо автомобіль № 1 після зіткнення матиме швидкість v_3 , а автомобіль № 2 матиме швидкість v_4 , то кількість руху двох автомобілів до зіткнення повинна дорівнювати кількості руху цих автомобілів після зіткнення:

$$W_1 v_1 + W_2 v_2 = W_1 v_3 + W_2 v_4. \quad (1)$$

Якщо автотранспортні засоби після зіткнення рухатимуться зі швидкістю v_3 в зчепленому стані, то рівняння (1) буде мати такий вигляд:

$$W_1 v_1 + W_2 v_2 = (W_1 + W_2) v_3. \quad (2)$$

При застосуванні цих рівнянь слід зважати на важливу особливість, що їх складовою є векторна швидкість, тобто швидкість, яка має певний напрям руху автотранспортних засобів [9].

Розглянемо тепер зіткнення автомобілів (заднє), при якому обидва автомобілі у момент зіткнення рухалися. У разі, коли автоексперт може визначити місце зіткнення, та обидва автомобілі після зіткнення ковзають до повної зупинки, то рівняння кількості руху після зіткнення має вигляд:

$$P = W_1 v_3 + W_2 v_4 = W_1 \sqrt{254 \varphi S_1} + W_2 \sqrt{254 \varphi S_2}, \quad (3)$$

де S_1 – довжина сліду ковзання автомобіля № 1;

S_2 – довжина сліду ковзання автомобіля № 2;

φ – коефіцієнт зчеплення шин з дорожнім покриттям.

Слід відзначити, що чим більший коефіцієнт зчеплення шин з дорожнім покриттям, тим меншу відстань долає транспортний засіб за менший час, та навпаки (коефіцієнт зчеплення на сухому асфальтобетонному покритті становить 0,7-0,8, а для мокрого асфальтобетонного покриття – 0,5-0,6).

Рівняння кількості руху до зіткнення:

$$P = W_1 v_1 + W_2 v_2, \quad (4)$$

в якому v_1 і v_2 невідомі. Проте відомо, що v_1 більше, ніж v_2 , інакше зіткнення не відбудеться. Коли прирівняти рівняння (3) та (4):

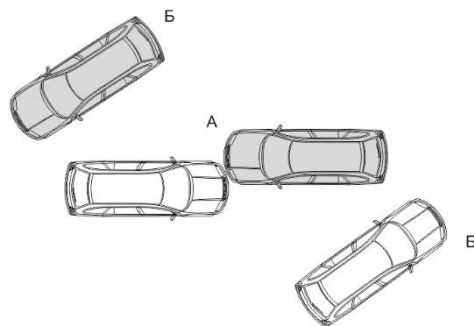
$$W_1 v_1 + W_2 v_2 = W_1 \sqrt{254 \varphi S_1} + W_2 \sqrt{254 \varphi S_2}, \quad (5)$$

в яких відомі усі величини, окрім v_1 і v_2 , то отримаємо одне рівняння з двома невідомими.

Швидкості автомобілів при задньому зіткненні не можуть бути визначені у разі, коли не буде визначена зі слів водія швидкість одного з автомобілів перед моментом зіткнення. Якщо водій другого автомобіля може повідомити, яка була швидкість його автомобіля перед зіткненням, тоді можливо визначити швидкість v_1 .

Зустрічні ексцентричні зіткнення є більш поширеними дорожньо-транспортними подіями на автомобільній смузі, що вимагають проведення експертизи. При таких зіткненнях основна увага автоексперта повинна бути спрямована на з'ясування того, на якій стороні від осової лінії смуги відбулося зіткнення. Після зіткнення автомобілі можуть відокремитися один від одного, продовжити рух і зупинитися, тому визначити місце зіткнення буде досить важко. Щодо кутових зіткнень, то вони зазвичай супроводжуються обертанням автотранспортних засобів після удару. Враховуючи те, що напрям сили при ударі не збігається з напрямом поздовжньої осі автомобілів, автомобілі зазвичай мають тенденцію до обертання.

При зустрічному ексцентричному зіткненні автотранспортних засобів лівими сторонами відбувається їх обертання проти годинникової стрілки, після чого ТЗ переміщуються один від одного (рисунки 4). Насправді переміщення і повороти ТЗ можуть бути більшими чи меншими порівняно з тим, як це подано на рисунку 4, і залежать від площі поверхні дотику при зіткненні автомобілів, стану дорожнього покриття тощо. При таких зіткненнях завжди має місце обертання і подальше переміщення автомобілів. Необхідно звернути увагу на те, що при таких зіткненнях кожний автотранспортний засіб переміщається з місця зіткнення у бік своєї сторони дороги.



А – розташування автомобілів у момент зіткнення;
Б – розташування ТЗ після зіткнення

Рисунок 4 – Типове розташування автомобіля після кутового зіткнення

Зустрічне центральне зіткнення відбувається досить рідко, оскільки водії ТЗ прагнуть ухилитися від зустрічного зіткнення, і тому більшість дорожньо-транспортних пригод супроводжуються кутовим або бічним зіткненням (ударами). Треба наголосити, що зустрічні зіткнення мають свої особливості. При такому виді зіткнення автомобілі зупиняються на місці зіткнення або переміщуються на рівні відстані, якщо їх вага та швидкості на момент зіткнення були однаковими. Якщо вага автомобілів і їх швидкості були неоднакові, легший ТЗ або такий, що рухався з меншою швидкістю, буде відкинутий назад від місця зіткнення. Автомобілі зазвичай не обертаються, і уламки від зіткнення займають невелику площу дороги. Швидкість зіткнення в цьому випадку не може бути визначена, оскільки маємо лише одне рівняння кількості руху з двома невідомими швидкостями.

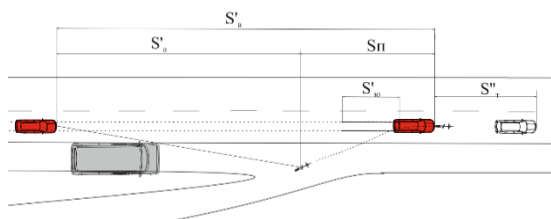
Результати досліджень. Дослідивши методи розрахунків [2, 3, 4], встановлено, що вони є не повною мірою ефективними і не дають можливості повною мірою дослідити обставини виникнення ДТП.

Для цього авторами статті запропонований метод логіко-інформаційної реалізації дослідження, який є доцільним для використання в експертній практиці НДЕКЦ України та інших держав. Розглянемо зазначений метод на прикладі.

При русі в попутному з перешкодою напрямку відстань від транспортного засобу до місця зіткнення в момент виникнення небезпеки руху залежить від моменту часу, коли водій почне гальмувати. Чим раніше він натисне на гальма, тим на більшу відстань встигає просунутись перешкода, тим далі буде місце наїзду (зіткнення). За певних умов пе-

решкода може взагалі опинитися за межами досяжності цим транспортним засобом.

Така подія виникає при раптовому виїзді велосипедиста на смугу руху транспортного засобу, що рухається зі значно більшою швидкістю. Аналогічна подія може статися за умови, що водій при обмеженій оглядовості виїздить на У-подібне перехрестя та не пропускає транспортні засоби, що рухаються в попутному напрямку по головній смузі руху (рисуюнок 5).



Рисуюнок 5 – Дорожня ситуація при попутному зіткненні

Відстань до місця зіткнення в момент виникнення небезпеки для руху, якщо б водій своєчасно загальмував, може бути вирішено за такою формулою [4]:

$$S_a = \frac{V_n}{13 \cdot J} \times \left[\Delta V + 3,6 \cdot J \cdot T - \sqrt{\Delta V^2 - 25,92 \cdot J \cdot \left(S'_a - \frac{\Delta V}{3,6} \cdot T \right)} \right] + S'_a, \quad (6)$$

де V_n – швидкість перешкоди;
 J – сповільнення при екстреному гальмуванні;
 ΔV – різниця швидкостей транспортного засобу та перешкоди, км/год;
 T – час приведення гальм в дію, с;
 S'_a – відстань від автотранспортного засобу до перешкоди в момент виникнення небезпеки, м.

Відстань S'_a визначається шляхом наступних розрахунків:

- при зіткненні в процесі гальмування транспортного засобу:

$$S'_a = S_n \cdot \left(\frac{V_a}{V_n} - 1 \right) - \left[\sqrt{\frac{V_a^2}{25,92 \cdot J}} - \sqrt{S''_T} \right]^2, \quad (7)$$

де S''_T – відстань, на яку перемістився би загальмований транспортний засіб після зіткнення до зупинки, якщо б він не був затриманий при ударі, м;

- при зіткненні до початку гальмування:

$$S'_a = S_n \cdot \left(\frac{V_a}{V_n} - 1 \right), \quad (8)$$

де S_n – відстань, яку пододала перешкода з моменту виникнення небезпеки для руху до зіткнення, м.

При зіткненні чи наїзді транспортних засобів на велосипедистів та мотоциклістів величина S''_T фактично дорівнює дійсному переміщенню транспортного засобу, що гальмує після наїзду на перешкоду до його повної зупинки.

При зіткненні транспортних засобів величина S''_T може бути визначена за формулою:

$$S''_T = \sqrt{\frac{V_a^2}{25,92 \cdot J}} - \left(S'_{ю} + \frac{V_a \cdot t_3}{7,2} \right), \quad (9)$$

де $S'_{ю}$ – довжина сліду юзу транспортного засобу до моменту зіткнення, м;

t_3 – час наростання сповільнення при екстреному гальмуванні, с.

При виведенні формули (6) враховується, що за час подолання перешкоди на відстані S_n транспортний засіб долає відстань $S_a = S'_a + S_n$, і що при своєчасному гальмуванні транспортного засобу $S_n = V_n \cdot (T + t'_T)$.

Розрахунок за формулою (6) доцільний лише при встановленні механізму пригоди. Для вирішення питання технічної можливості у водія попередити ДТП достатньо встановити знак підкореневого виразу. Якщо підкореневий вираз має від'ємне значення, це означає, що при своєчасному гальмуванні транспортним засобом дійсних значень відстані S_a не існує, тобто зіткнення з перешкодою не могло бути, та навпаки, якщо підкореневий вираз додатний, то зіткнення відбулося б і при своєчасному гальмуванні транспортного засобу. Однак для визначення доцільно користуватися виразом

$$x = \Delta V - 3,6 \cdot j \cdot T \cdot \left[\sqrt{\frac{2 \cdot S'_a}{j \cdot T^2} + 1} - 1 \right]. \quad (10)$$

Висновок про наявність у водія технічної можливості уникнути зіткнення можливо зробити, якщо $x < 0$; якщо $x > 0$, у водія була відсутня можливість уникнути зіткнення.

У випадках, коли зустрічний транспортний засіб до моменту зіткнення не загальмував, дослідження наявності у водія технічної можливості уникнути зіткнення шляхом гальмування втрачає сенс, адже зниження швидкості або навіть зупинка не виключають можливості зіткнення.

Якщо водій зустрічного транспортного засобу загальмував, при наявності необхідних вихідних даних, це експертне дослідження може бути вирішено. Для цього слід встановити місцезнаходження зустрічного транспортного засобу в момент, коли водій ще мав змогу запобігти зіткненню шляхом гальмування і оцінити виниклу дорожню обстановку.

Перш за все, визначаємо відстань від першого транспортного засобу до місця зіткнення з зустрічним транспортним засобом S_1 , в момент часу, коли водій ще мав технічну можливість запобігти зіткненню (рисунк 6):

$$S_1 = S_{o-1} + S''_{T-2}, \quad (11)$$

де S_{o-1} – зупиночний шлях певного транспортного засобу, м;

S''_{T-2} – відстань, яку подолав би від місця зіткнення, рухаючись у загальмованому стані, зустрічний автомобіль, якби його рух не був затриманий при зіткненні, м.

$$S''_{T-2} = \frac{V_{y-2}^2}{25,92 \cdot j}, \quad (12)$$

де V_{y-2} – швидкість зустрічного автотransпортного засобу безпосередньо при зіткненні, км/год, що визначається за формулою

$$V_{y-2} = \sqrt{V_2^2 - 25,92 \cdot S'_{T-2} \cdot j}, \quad (13)$$

V_2 – швидкість зустрічного автомобіля;
 S'_{T-2} – відстань, яку подолав зустрічний автомобіль у стані гальмування до моменту зіткнення, м, що визначається за формулою

$$S'_{T-2} = S'_{ю-2} + \frac{V_2 \cdot t_{3-2}}{7,2}, \quad (14)$$

$S'_{ю-2}$ – довжина сліду гальмування, що залишився від коліс зустрічного автомобіля до моменту зіткнення, м.

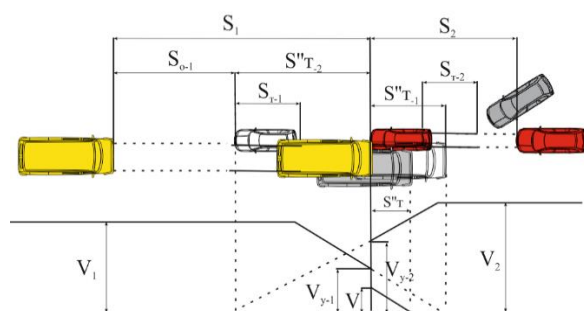


Рисунок 6 – Дорожня обстановка при зустрічному зіткненні

Після цього визначаємо відстань від зустрічного транспортного засобу до місця зіткнення з транспортним засобом S_2 в той момент, коли водій зазначеного транспортного засобу ще мав можливість уникнути зіткнення шляхом гальмування:

$$S_2 = (t - t'_{T-2}) \cdot \frac{V_2}{3,6} + S'_{T-2}, \quad (15)$$

де t – час подолання цим транспортним засобом відстані S_1 , с, визначається за формулою

$$t = \frac{S_1 - S'_{T-1}}{V_1} \cdot 3,6 + T'_{T-1}; \quad (16)$$

S'_{T-1} – відстань, яку подолав цей транспортний засіб у загальмованому стані до зіткнення, м, визначається за формулою

$$S'_{T-1} = S'_{ю-1} + \frac{V_1 \cdot t_{3-1}}{7,2}, \quad (17)$$

де $S'_{ю-1}$ – довжина сліду юзу, залишеного колесами цього транспортного засобу до зіткнення, м;

t'_{T-1} – час руху цього транспортного засобу у загальмованому стані до зіткнення, визначається за формулою

$$t'_{T-1} = \frac{V_1}{3,6 \cdot j} - \sqrt{\frac{2}{j} \cdot \left(\frac{V_1^2}{25,92 \cdot j} - S'_{T-1} \right)}; \quad (18)$$

V_1 – швидкість автотransпортного засобу до початку гальмування, км/год.

У разі, коли відстань між транспортними засобами дорівнювала $S_1 + S_2$, водій цього автотransпортного засобу міг визначити небезпеку дорожньої обстановки, з цього випливає висновок, що водій мав технічну можливість запобігти зіткненню, та навпаки.

Обговорення результатів. Оскільки метою кожного експертного дослідження механізму дорожньо-транспортної пригоди є встановлення даних, які дають можливість оцінити дії водія по уникненню шкідливих наслідків ДТП, основне значення має встановлення того, що трапилося на стадії виникнення пригоди, коли водії мали можливість і повинні були оцінити дорожню обстановку як небезпечну та вжити всіх необхідних заходів.

Застосований до цієї задачі принцип логіко-інформаційної реалізації дослідження ДТП полягає в послідовній реалізації стратегій «з минулого в сьогодення» (аналіз) [13] та «із сьогодення в майбутнє» (синтез), що подані в [13]. Розглядаючи окремі етапи інформатизації експертних досліджень, як і в дослі-

дженнях [1, 17], автори простежують діалектичну спіраль розвитку об'єктів, систем і процесів інформатизації, керування розробкою цих процесів, їх виготовлення та експлуатації. Розвиток діалектичної спіралі забезпечує інформаційний зв'язок між функціонуванням об'єктів, процесів і систем інформатизації НДЕКЦ України та організаціями і установами, що забезпечують створення й удосконалювання процесу експертних досліджень в майбутньому та полегшують реалізацію експертиз за допомогою ЕОТ.

Висновки. У статті встановлено характеристику особливостей руху транспортних засобів та динаміку процесів при подовжньому їх зіткненні. З'ясовано механізми зіткнення при подовжніх ДТП. Визначено заходи вдосконалення технології експертних досліджень, які мають вирішальне значення та впливають на висновок при проведенні автотехнічної експертизи. Зазнав вдосконалення метод встановлення механізму дорожньо-транспортної пригоди при подовжніх зіткненнях, який сьогодні застосовується підрозділом НДЕКЦ України в Черкаській області. Застосування цього методу дає змогу зробити головний висновок експертизи: чи мав водій можливість уникнути зіткнення. Запропонований у дослідженні метод може бути реалізований засобами обчислювальної техніки, що є перспективою подальших наукових досліджень систем інформатизації підрозділів НДЕКЦ України.

Список використаних джерел

- [1] С. В. Ромашко, В. Б. Харенко, В. В. Литовченко, та М. В. Підгорний, "Моделі руху автотransпортних засобів при перехресних зіткненнях", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, с. 114-123, 2021.
- [2] Э. Р. Домке, *Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий*: учеб. пособие по направлению подготовки 23.03.01 "Технология транспортных процессов". Пенза, Россия: ПГУАС, 2016.
- [3] В. А. Иларионов, *Экспертиза дорожно-транспортных происшествий*: учебник для вузов. Москва, Россия: Транспорт, 1989.
- [4] Н. М. Кристи, *Методические рекомендации по производству автотехнической экспертизы*: справ. пособие. Москва, Россия: ЦНИСЭ, 1971.
- [5] И. С. Степанов, Ю. Ю. Покровский, В. В. Ломакин, и Ю. Г. Москалева, *Влияние элементов системы водитель - автомобиль - дорога - среда и безопасность дорожного движения*: учеб. пособие для студентов, обучающихся по спец. "Автомобиле- и тракторостроение". Москва, Россия: МГТУ "МАМИ", 2014.
- [6] Ю. Г. Корухов, *Транспортно-трассологическая экспертиза по делам о дорожно-транспортных происшествиях*: метод. пособие для экспертов, следователей и судей. Москва, Россия: Библиотека эксперта, 2006.
- [7] С. А. Евтюков, и Я. В. Васильев, *Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий*. Санкт-Петербург, Россия: Изд-во ДНК, 2004.
- [8] Ю. Б. Суворов, *Судебная дорожно-транспортная экспертиза. Судебно-экспертная оценка действий водителей и других лиц, ответственных за обеспечение безопасности дорожного движения, на участках ДТП*: учеб. пособие. Москва, Россия: Экзамен, 2004.
- [9] В. А. Бекасов, Г. Я. Боград, Б. Л. Зотов, и Г. Г. Индиченко, *Автотехническая экспертиза*. Москва, Россия: Юрид. лит-ра, 1967.
- [10] Eric R. Green, Kenneth R. Agent, Jerry G. Pigman, and Paul A. Ross, "Analysis of Traffic Crash Data in Kentucky (2012-2016)", Kentucky Transportation Center Research Report, 2017.
- [11] H. Ward Smith, "Physical evidence in the investigation of traffic accidents", *J. Crim. L. & Criminology*, no. 48, 1993.
- [12] Т. Г. Гасанов, и М. Р. Гусейнов, "К установлению характеристик динамики процесса столкновения транспортных средств и наезда на препятствие", *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*, № 21, с. 77-82, 2011.
- [13] М. В. Підгорний, "Інформатизація виробничих процесів транспортної інфраструктури", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 1, с. 14-20, 2014.

- [14] В. В. Столяров, *Экспертиза дорожно-транспортных происшествий на основе теории риска: учеб. пособие*. Саратов, Россия, 1996.
- [15] І. Б. Гевко, О. Л. Ляшук, та Р. В. Хоросун, *Конспект лекцій з дисципліни "Автотехнічна експертиза дорожньо-транспортних пригод"*, Тернопіль, Україна, 2016.
- [16] A. Sinha, S. Chand, V. Vu et al., "Crash and disengagement data of autonomous vehicles on public roads in California", *Sci. Data*, no. 8, p. 298, 2021.
- [17] D. S. Kirk, N. Cavalli, and N. Brazil, "The implications of ridehailing for risky driving and road accident injuries and fatalities", *Social Science & Medicine*, vol. 250, Article ID 112793, 2020.
- [7] S. A. Evtyukov, and Ya. V. Vasiliev, *Investigation and expertise of road traffic accidents*. St. Petersburg, Russia: Izd-vo DNK, 2004 [in Russian].
- [8] Yu. B. Suvorov, *Judicial road transport expertise. Forensic expert assessment of the actions of drivers and other persons responsible for ensuring road safety at road traffic accidents: a textbook*. Moscow, Russia: Examen, 2004 [in Russian].
- [9] V. A. Bekasov, G. Ya. Bograd, B. L. Zotov, and G. G. Indichenko, *Automotive expertise*. Moscow, Russia: Yurid. lit-ra, 1967 [in Russian].
- [10] Eric R. Green, Kenneth R. Agent, Jerry G. Pigman, and Paul A. Ross, "Analysis of Traffic Crash Data in Kentucky (2012-2016)", Kentucky Transportation Center Research Report, 2017.
- [11] H. Ward Smith, "Physical evidence in the investigation of traffic accidents", *J. Crim. L. & Criminology*, no. 48, 1993.
- [12] T. G. Gasanov, and M. R. Guseinov, "On the establishment of characteristics of the dynamics of the process of vehicles collision and collision with an obstacle", *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*, no. 21, pp. 77-82, 2011 [in Russian].
- [13] M. V. Pidgorniy, "Informatization of production processes in transport infrastructure", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universytetu*, no. 1, pp. 14-20, 2014 [in Ukrainian].
- [14] V. V. Stolyarov, *Expertise of road traffic accidents on the basis of risk theory: a textbook*. Saratov, Russia, 1996 [in Russian].
- [15] I. B. Gevko, O. L. Lyashuk, and R. V. Khoroshun, Summary of lectures on the discipline "Auto-technical examination of road accidents", Ternopil, Ukraine, 2016 [in Ukrainian].
- [16] A. Sinha, S. Chand, V. Vu et al., "Crash and disengagement data of autonomous vehicles on public roads in California", *Sci. Data*, no. 8, p. 298, 2021.
- [17] D. S. Kirk, N. Cavalli, and N. Brazil, "The implications of ridehailing for risky driving and road accident injuries and fatalities", *Social Science & Medicine*, vol. 250, Article ID 112793, 2020.

References

- [1] S. V. Romashko, V. B. Kharenko, V. V. Lytovchenko, and M. V. Pidhornyy, "Models of motion of motor vehicles in cross-collisions", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universytetu*, no. 1, pp. 114-123, 2021 [in Ukrainian].
- [2] E. R. Domke, *Investigation and expertise of road traffic accidents: a textbook in the direction of training 23.03.01 "Technology of transport processes"*. Penza, Russia: PGUAS, 2016 [in Russian].
- [3] V. A. Ilarionov, *Expertise of road traffic accidents: a textbook for universities*. Moscow, Russia: Transport, 1989 [in Russian].
- [4] N. M. Christie, *Guidelines for the production of auto-technical expertise: a reference guide*. Moscow, Russia: TsNISE, 1971 [in Russian].
- [5] I. S. Stepanov, Yu. Yu. Pokrovsky, V. V. Lomakin, and Yu. G. Moskaleva, *Influence of the elements of the system driver - car - road - environment and traffic safety: a textbook for students studying in the specialty "Automotive and Tractor Engineering"*. Moscow, Russia: MGTU "MAMI", 2014 [in Russian].
- [6] Yu. G. Korukhov, *Transport and trasological expertise on cases of road traffic accidents: a method. guide for experts, investigators and judges*, Moscow, Russia: Biblioteka eksperta, 2006 [in Russian].

S. V. Romashko, *Head of the Automotive Research Sector,*
V. B. Kharenko, *Forensic Expert of the Automotive Research Sector,*
Cherkasy Scientific Research Forensic Centre of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine
Pasterivska st., 104, Cherkasy, 18009, Ukraine
M. V. Pidhornyy, *Ph. D., Associate Professor,*
Dean of the Faculty of Computer Technologies of Mechanical Engineering and Design,
V. V. Lytovchenko, *Postgraduate*
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

MODELS OF MOVEMENT OF VEHICLES IN LONGITUDINAL COLLISIONS

With the increase in traffic, the number of road accidents increases. The causes of a traffic accident are the result of two or more active violations of traffic safety rules that create an integrative integrated system.

The aim of the article is to model the mechanism of longitudinal collision of vehicles and study the peculiarities of their movement to establish the characteristics of the dynamics of this process in collisions, which is necessary to improve the methods of investigating the circumstances of traffic accidents in longitudinal collisions.

In the process of auto-technical examination in the study of collisions it is relevant to develop the technology in order to establish the mechanism of the accident. The road accident is fixed by the scheme of the accident which allows you to establish a mutual arrangement of cars after collision. Their kinematic characteristics prior to the accident are not always known, this can lead to a collision during the examination. The model of the mechanism of development of road accident, as a rule, is estimated on the basis of various examinations or carrying out full-scale modeling. This approach allows you to give only a qualitative assessment, far from objective. Therefore, the task of forming a mathematical model that takes into account the peculiarities of the movement of the car as a dynamic system arises.

To do this, the authors propose a method of logical and informational implementation of the study, which is appropriate for use in expert practice.

When an obstacle moves in the accompanying direction, the distance from the vehicle to the place of impact at the time of danger to traffic depends on when the driver starts to brake. The sooner he brakes, the longer the obstacle will move, the farther there will be the place of impact. Under certain conditions, this obstacle may even be out of reach of the vehicle. This road condition occurs when cyclists suddenly leave the lane of a car moving at a higher speed. A similar situation can arise when drivers with limited visibility go to the crossroads and do not pass vehicles moving in the same direction in the main lane.

The principle of logical and informational implementation of road accident research is applied to the given task in the consistent implementation of strategies "from the past to the present" (analysis) and "from the present to the future" (synthesis). Considering the individual stages of informatization of expert research, the authors trace the dialectical spiral of development of objects, processes and systems of informatics, management of their development and operation.

The article with the help of modeling and establishing the characteristics of the dynamics of processes in the longitudinal collision of vehicles clarifies the mechanisms of collision in longitudinal traffic accidents, outlines the measures on improvement of research technology during the examination, which are important and influence the conclusion of the auto-technical examination. The improvement of the method of establishing the mechanism of a traffic accident is proposed. The use of this method makes it possible to conclude whether the driver had the opportunity to avoid a collision. The proposed method has the ability to be implemented by means of computer technology.

Keywords: car, road accident, research, forensic examination, auto-technical examination.

[0000-0001-6302-565X] **А. Г. Батурінець,**

e-mail: baturinets.anastasiya@gmail.com

[0000-0001-6611-4543] **С. В. Антоненко, канд. техн. наук, доцент**

e-mail: svtlanav.antonenko@gmail.com

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
просп. Гагаріна, 72, м. Дніпро, 49010, Україна

ПОДОВЖЕННЯ РЯДІВ ДАНИХ ЗА ЗНАЧЕННЯМИ ПОКАЗНИКІВ СХОЖИХ РЯДІВ

Проблема недостатності інформації суттєво впливає на вибір підходів та методів аналізу рядів даних, а також на якість отримуваних результатів. Зважаючи на таку проблему, автори роботи вважають, що актуальним є питання розробки й аналізу підходів та моделей для подовження рядів даних. Основною задачею є описання та реалізація технології подовження рядів даних. В основу реалізації технології закладено використання значень схожих рядів даних як ознак для подовження певного ряду даних, представленого тими ж показниками, що й схожі ряди даних. В роботі описано схему визначення схожих рядів даних. Згідно з цією схемою найбільш схожими рядами даних є такі, що мають найменше значення відстані та сильний прямий кореляційний зв'язок, обчислені між потенційно схожим рядом та рядом, для якого буде відбуватися подовження. Для подовження ряду розглядаються сім моделей. За результатами обчислювального експерименту встановлено, що найкращі результати отримано при використанні двох моделей: суми зважених значень по групі схожих рядів та середньозважених значень по групі схожих рядів, з коригуванням на середнє значення ряду, для якого виконується подовження. В результаті проведеного аналізу можна дійти висновку про можливість використання розробленої технології для вирішення задачі подовження рядів даних. При подальших дослідженнях планується використання отриманих результатів для розробки та аналізу методів поповнення пропущених значень у часових рядах.

Ключові слова: часові ряди, регресія, поповнення даних, машинне навчання, sklearn, недостатність даних, гідрологія.

Вступ. Своєчасний, точний та якісний аналіз вхідних даних є важливою складовою успішного розв'язання великої кількості прикладних задач у різних галузях.

Все частіше для розв'язання прикладних задач використовуються більш складні регресійні моделі та методи машинного навчання. Приклади використання можна побачити в роботах: [1] – прогнозування вартості легкових авто, [2] – прогнозування повеней, [3] – прогнозування потоків та рівнів води, [4] – прогнозування вартості криптовалют, в [5] використовуються для прогнозування цін на нерухомість. В роботі [6] представлено огляд та класифікацію моделей прогнозування. Роботи [7-9] присвячені питанням прогнозування гідрологічної інформації.

Проблема коротких часових рядів та малих вибірок трапляється достатньо часто в задачах аналізу даних, зокрема висвітлена в роботі [10]. Недостатність інформації суттєво впливає на вибір методів аналізу та якість

отримуваних результатів. Окрім цього, наявність рядів даних різної довжини викликає необхідність або обирати методи, пристосовані для аналізу рядів різної довжини, або скорочувати довжину всіх рядів даних до однакового розміру, або моделюванням подовжувати ряди спостережень. Слід також зазначити, що неможливо однозначно вказати, якої саме довжини ряди даних вважати короткими, а які – ні. Наприклад, у гідрологічних розрахунках короткими рядами вважаються всі ряди, що не відповідають принципам репрезентативності та точності статистичних оцінок, тобто короткими рядами спостережень можуть вважатися часові ряди з показниками як за десять років, так і за двадцять.

Зважаючи на вищевикладене, актуальним є питання не лише розробки методів та підходів аналізу коротких рядів даних, але й методів та моделей подовження рядів даних та їх програмної реалізації.

Мета та задачі дослідження. Основною метою роботи є дослідження можливостей подовження рядів даних за значеннями показників схожих рядів, реалізація та аналіз технології подовження рядів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1) визначити схожі ряди, значення яких будуть використовуватися в моделях. Для вирішення цієї задачі пропонується застосувати обчислювальну схему, де визначення схожості рядів даних проводиться на підставі обчислення значень відстані та коефіцієнта кореляції;

2) реалізувати моделі, які будуть використовуватися для подовження ряду. Для виконання поставленої задачі варто реалізувати сім моделей: лінійної множинної регресії; суми зважених значень по групі схожих рядів; середньозважених значень по групі схожих рядів, з коригуванням на середнє значення ряду, для якого виконується подовження; випадкового лісу; k -найближчих сусідів; методу опорних векторів; градієнтного бустінгу;

3) забезпечити представлення результатів роботи технології у вигляді графіків, таблиць, значень розрахованих оцінок, що надасть можливість провести аналіз роботи технології.

Виклад основного матеріалу. Ідея застосування цього підходу полягає в тому, що моделям регресії як ознаки, за якими обчислюється відповідне значення для подовження ряду, передаються значення схожих рядів. Таким чином, першочергово для подовження деякого ряду T необхідно визначити найбільш схожі ряди даних.

Визначення схожих рядів виконується за схемою:

1) обчислюються відстані між рядом, для якого відбуватиметься подовження, та рядами, значення яких потенційно можуть бути використані як факторні ознаки для моделі регресії;

2) на підставі отриманих результатів у п. 1 за кожним запропонованим типом відстані обираються k найближчих рядів (мають найменші значення відстані). Таким чином, отримуємо кількість множин, що дорівнює кількості використовуваних відстаней;

3) далі знаходимо перетин множин, отриманих на етапі виконання п. 2;

4) для набору рядів, що залишилися після виконання п. 3, та ряду, для якого буде виконуватися подовження, розраховуємо коефіцієнти кореляції Пірсона та відкидаємо ряди, для яких значення коефіцієнта кореляції є меншим ніж 0,75.

Незалежно від кількості представлених для порівняння рядів, в результаті буде отримано набір рядів у кількості, що не перевищує k . Всі відібрані ряди даних матимуть відносно невеликі, порівняно з іншими, значення відстаней та сильний прямий кореляційний зв'язок з рядом, для якого визначаються схожі ряди.

Якщо в результаті визначення схожих рядів за наведеною схемою отримано порожню множину, тоді необхідно повторити обчислення, змінивши один або декілька наступних параметрів:

- набір використовуваних відстаней;
- період спільних спостережень (зменшити/збільшити);
- значення k .

У роботі для подовження ряду використовуються моделі випадкового лісу (далі RFR) [11], k -найближчих сусідів (далі KNR) [12], методу опорних векторів (далі SVR) [13] та градієнтного бустінгу (далі GBR) [14], реалізованих з використанням бібліотеки `sklearn` на `python` [15]. Перераховані моделі є досить відомими в задачах прогнозування та групування рядів даних.

Крім того, реалізовано й більш прості в обчисленні моделі: множинна лінійна регресія, сума зважених значень по групі схожих рядів та модель, побудована за середньозваженими значеннями по групі, з коригуванням на середнє значення ряду, для якого виконується подовження.

Введемо позначення: T – ряд, для якого проводиться подовження; S – схожий ряд даних; $k = \overline{1, N}$, де N – кількість схожих рядів даних; $\bar{T}$ – середнє значення ряду T на навчальному відрізку; $\bar{S}_k$ – середнє значення певного k -го ряду даних на навчальному відрізку; $i = \overline{1, M}$, де M – кількість значень, на які буде подовжено ряд T .

Множинна лінійна регресія (далі LR) представлена формулою

$$T_i = a_0 + S_{1,i} * a_1 + S_{2,i} * a_2 + \dots + S_{N,i} * a_N, \text{ де } a_k - \text{параметри регресії, } k = \overline{0, N}.$$

Модель суми зважених значень по групі схожих рядів (далі SWG):

$$T_i = S_{1,i} * w_1 + S_{2,i} * w_2 + \dots + S_{N,i} * w_N,$$

де $w_i \in [0; 1]$ – вага складової кожного схожого ряду, розрахована за формулою

$$w_i = \frac{q_i}{\sum_{i=1}^N q_i}, \quad (1)$$

де $\sum_{i=1}^N w_i = 1$, а q_i розраховано за формулою

$$q_i = \sum_{k=1}^N MSE - MSE_k, \quad (2)$$

де $\sum_{k=1}^N MSE$ – середнє значення похибки MSE , розрахованої між кожним порівнюваним рядом S та рядом T , MSE_k – похибка MSE на періоді спільних спостережень між S_k та T ; похибка MSE , розрахована за формулою

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - S_i)^2. \quad (3)$$

Завдяки ваговим коефіцієнтам w_i з використанням формул (1-3) вплив значень кожного ряду на результат є обернено пропорційним значенню розрахованої оцінки MSE на періоді спільних спостережень між обраними схожими рядами та рядом, для якого відбувається подовження.

Для випадку, коли подовження рядів проводиться за значеннями двох схожих рядів даних, формула розрахунку w_i може бути спрощена та представлена в наступному вигляді:

$$w_i = \frac{\sum_{i=1}^N MSE - MSE_i}{\sum_{i=1}^N MSE}.$$

Модель, побудована на середньозважених значеннях по групі схожих рядів, з коригуванням на середнє значення ряду, для якого виконується подовження (далі SWGC), має наступний вигляд:

$$T_i = \left(\frac{S_{1,i}}{S_1} * w_1 + \frac{S_{2,i}}{S_2} * w_2 + \dots + \frac{S_{N,i}}{S_N} * w_N \right) * \bar{T}.$$

Для оцінки отриманих результатів використовуються значення похибок MSE , MAE , $MAPE$ та коефіцієнта детермінації R^2 .

Результати досліджень. Для проведення обчислювального експерименту обрано ряди гідрологічних даних, що представлені показниками рівнів води на постах спостережень басейну річки Дніпро. Потрібно виконати подовження ряду даних посту 79545, розташованого на річці Случ, м. Новоград-Волинський, Житомирської обл., за період з 01.01.2010 р. по 31.12.2010 р., тобто виконати подовження на 365 значень.

Період спільних спостережень – з 01.01.2000 р. по 31.12.2009 р. На рисунку 1 представлено 94 ряди даних, серед яких проводиться пошук схожих, та ряд посту 79545.



Рисунок 1 – Показники рівнів води, зафіксовані на гідрологічних постах басейну р. Дніпро

Першочергово необхідно визначити ряди, які мають найменші значення розрахованих відстаней, і лише для обраних рядів встановлювати наявність та силу кореляційного зв'язку.

За значеннями евклідової, манхеттенської та евклідової зваженої відстаней, розрахованих на вихідних значеннях рядів, визначено, що схожими гідрологічними рядами є дані постів 79694, 79555, 80344, 79596. Період спільних спостережень заданий інтервалом з 01.01.2000 р. по 31.12.2009 р. Далі, за розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції визначено, що ряди показників постів 80344

та 79596 не мають сильного кореляційного зв'язку із рядом показників посту 79545, водночас значення коефіцієнтів кореляції для постів 79694 і 79555 становлять 0,77 та 0,82 відповідно. Таким чином, для подовження ряду даних посту 79545 будуть використовуватися значення постів 79694 та 79555. Слід також зазначити, що пости 79545, 79694 і 79555 розташовані на території Житомирської області, тобто мають відносно близьке географічне розташування.

На рисунку 2 відображено ряди посту 79545 та постів, визначених як найбільш схожі.

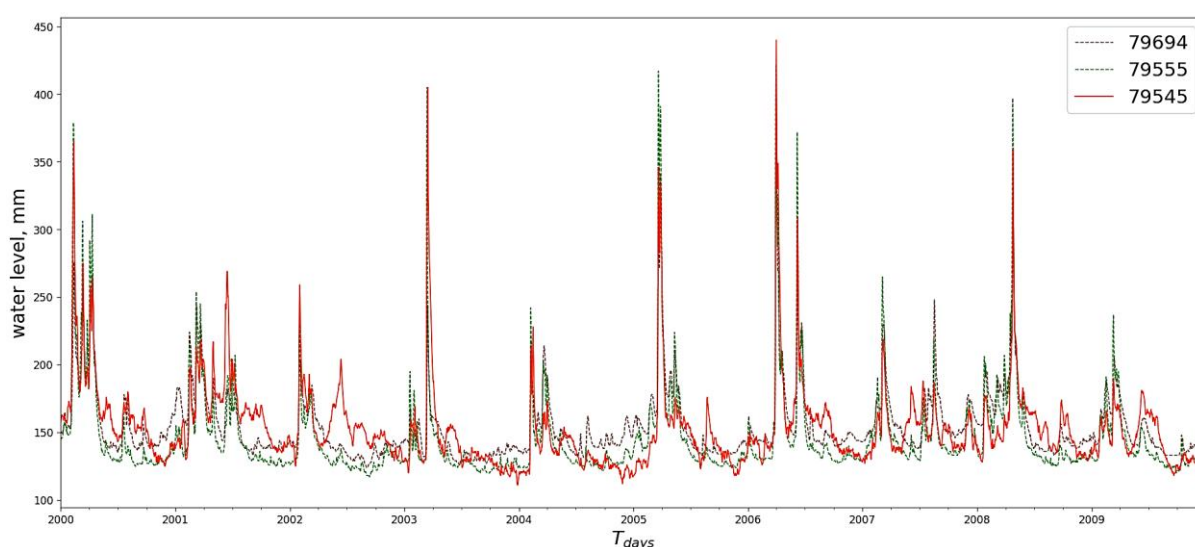


Рисунок 2 – Значення рівнів води за період спільних спостережень

В таблиці 1 наведено параметри налаштування моделей з бібліотеки sklearn [11-14].

Таблиця 1 – Параметри моделей

Модель	Параметри	Значення
RFR	max_features; criterion; n_estimators	sqrt; mse; 100
SVR	kernel; degree; cache_size	linear; 1; 200
GBR	learning_rate; n_estimators; validation_fraction	0.1; 100; 0.05
KNR	algorithm; metric; n_neighbors	auto; euclidean; k^2

Таблиця 2 містить оцінки якості наведених моделей, де ■ – найкращі значення за відповідною оцінкою, ■ – найгірші значення

за відповідною оцінкою (по стовпцях), min max – шкала допустимих значень.

Таблиця 2 – Оцінки якості моделей

Модель\ Оцінка	Оцінки			
	MSE	MAPE, %	MAE	R^2
LR	184,57	6,50	10,27	0,77
RFR	429,76	11,17	17,04	0,46
KNR	454,52	11,28	17,37	0,43
SVR	192,11	6,29	10,10	0,76
GBR	306,54	9,41	14,43	0,62
SWG	169,40	5,83	9,63	0,79
SWGC	160,31	5,98	9,72	0,80

На рисунку 3 представлено дані ряду посту 79545 та результати подовження за всіма використовуваними моделями за період з 01.01.2010 р. по 31.12.2010 р.

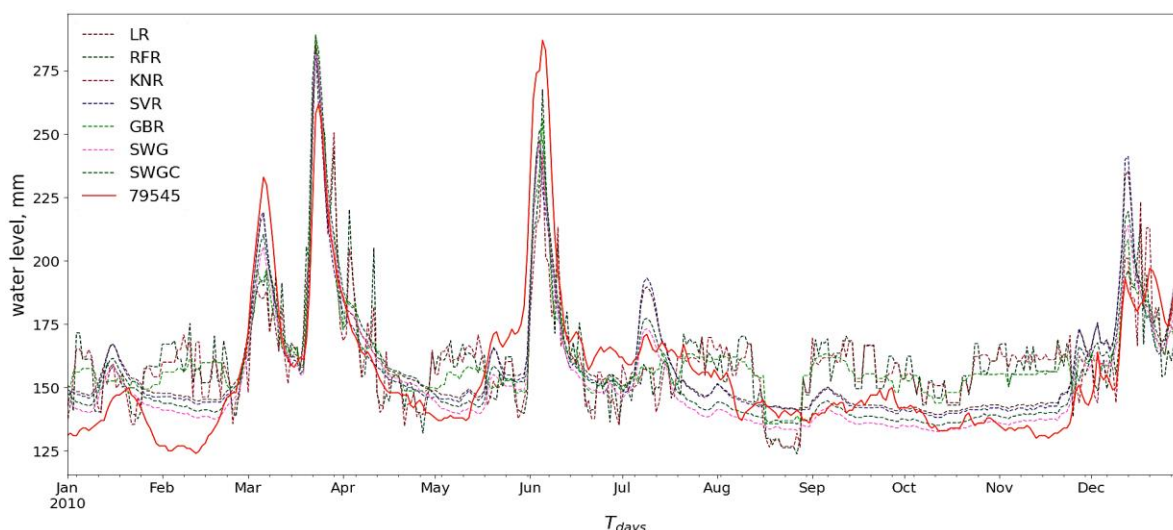


Рисунок 3 – Результати подовження ряду показників посту 79545

Рівняння моделей LR, SWG, SWGC мають наступний вигляд:

– модель множинної лінійної регресії:

$$T_i = 34.83 + S_{1,i} \times 0.1145 + S_{2,i} \times 0.6897,$$

де $S_{1,i}$ – значення ряду посту 79694, $S_{2,i}$ – значення ряду посту 79555;

– модель SWG:

$$T_i = S_{1,i} \times 0.5168 + S_{2,i} \times 0.4832;$$

– модель SWGC:

$$T_i = \left(\frac{S_{1,i}}{154.38} \times 0.5168 + \frac{S_{2,i}}{145.68} \times 0.4832 \right) \times 152.99.$$

В таблиці 3 наведено характеристики за кожною моделлю на періоді подовження.

В таблиці 4 подано інформацію щодо змін характеристик за кожною моделлю порівняно зі значеннями ряду 79545 на періоді подовження.

Дані, представлені в таблицях 3-4, дають краще розуміння можливих змін у характеристиках вихідного ряду при виборі певної моделі для подовження. В таблиці 4 відображено зміну характеристик отриманих рядів на періоді подовження до значень ряду 79545, виражені у відсотках, при використанні кожної з моделей. Для чотирьох моделей з найкращими оцінками (таблиця 1) побудовано діаграми розсіювання відносно лінійної регресії та за зазначеним коефіцієнтом кореляції Пірсона (рисунок 4).

Таблиця 3 – Характеристики рядів на періоді подовження

Показник	79545	LR	RFR	KNR	SVR	GBR	SWG	SWGC
Середнє значення	156,4	159,7	162,1	161,6	158,2	161,6	153,5	156,6
Стандартне відхилення	28,4	23,4	21,9	20,8	23,1	19,8	24,4	25,1
Мінімальне значення	124,0	139,4	123,8	126,5	138,2	135,7	132,6	135,1
Максимальне значення	287,0	285,4	283,7	285,8	282,4	289,1	281,7	288,4

Таблиця 4 – Зміна значень характеристик рядів на періоді подовження

Показник	LR	RFR	KNR	SVR	GBR	SWG	SWGC
Середнє значення	2,1%	3,6%	3,3%	1,2%	3,4%	-1,8%	0,1%
Стандартне відхилення	-17,4%	-22,8%	-26,6%	-18,7%	-30,1%	-14,0%	-11,7%
Мінімальне значення	12,4%	-0,2%	2,0%	11,5%	9,4%	6,9%	9,0%
Максимальне значення	-0,5%	-1,2%	-0,4%	-1,6%	0,7%	-1,9%	0,5%

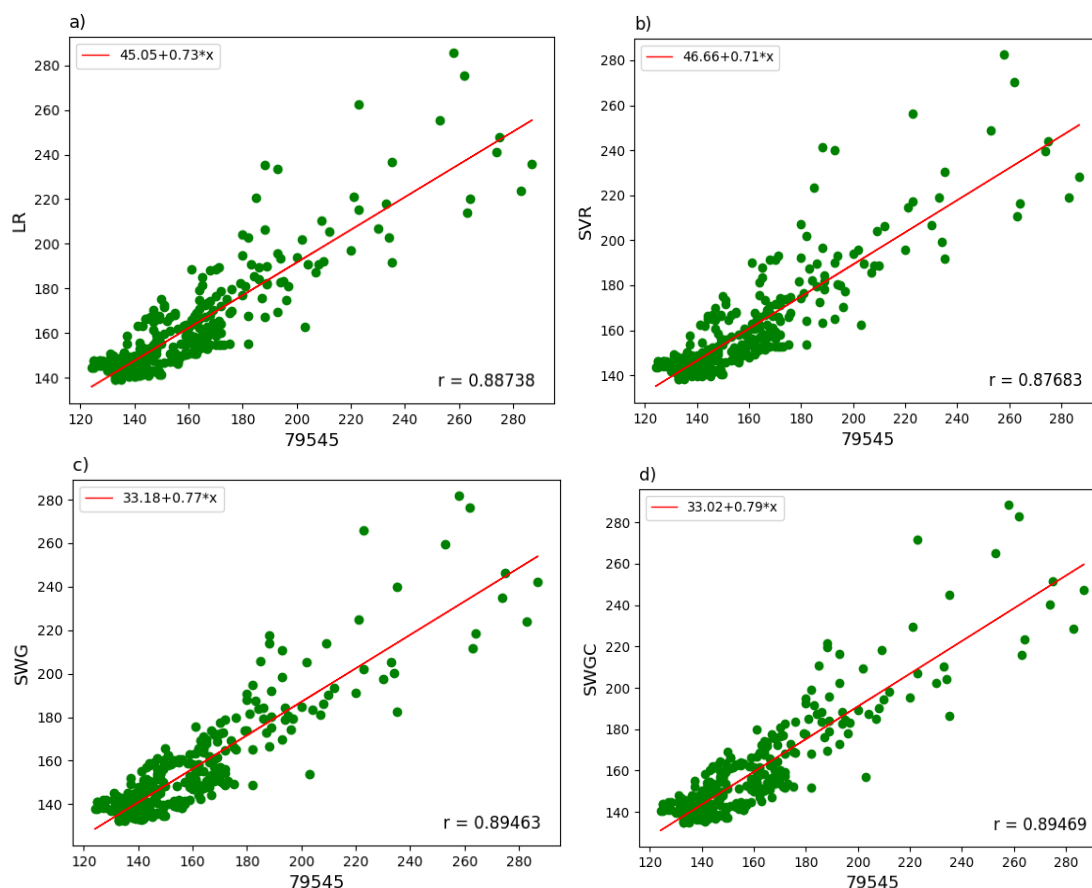


Рисунок 4 – Діаграми розсіювання для найкращих моделей відносно лінійної регресії для ряду 79545

Обговорення результатів. Серед усіх рядів даних, що обрано для аналізу як потенційно схожі на ряд показників посту 79545 (рисунок 1), визначено лише два ряди даних (рисунок 2), які за значеннями розрахованих відстаней та коефіцієнта кореляції можуть бути використані для подовження ряду показників посту 79545. За результатами проведеного подовження ряду показників посту 79545 за сьома представленими моделями встановлено, що найкращі оцінки (таблиця 2) отримано при використанні моделей SWG та SWGC. Найгірші результати при подовженні ряду за розрахованими оцінками показали моделі випадкового лісу та k -найближчих сусідів. За результатами, представленими в таблицях 3 та 4, можна зробити висновок, що кожна з моделей подовження по-різному впливає на характеристики модельованих значень порівняно з реальними значеннями ряду посту 79545 на періоді подовження. Наприклад, серед розглянутих моделей середнє значення та стандартне відхилення най-

менших змін зазнають при подовженні ряду за моделлю SWGC, а розмах значень вибірки зменшився приблизно на 6%. Якщо ж розглянути значення характеристик за моделями RFR та KNR (таблиця 4), то ситуація прямо протилежна моделі SWGC. За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції Пірсона, що відображені на графіках рисунка 3, найсильніший прямий кореляційний зв'язок між змодельованими і реальними даними на періоді подовження отримано з використанням моделей SWG (рисунок 3, c) та SWGC (рисунок 3, d).

Слід зазначити, що набір визначених схожих рядів суттєво впливає на отримувані результати подовження ряду. При визначенні схожих рядів із застосуванням значень відстаней можлива ситуація, коли ряди з сильним кореляційним зв'язком можуть бути відкинуті через не найменші значення відстаней. Залежно від використовуваних підходів до визначення схожих рядів, періоду спільних спостережень, періоду прогнозування, періоду навчання моделей, застосовуваних моделей то-

що можливо отримати різні результати та якість подовження ряду. Проте вже на етапі підгонки моделей можна отримати попередні дані щодо можливості отримання якісних результатів при прогнозуванні з використанням конкретної моделі.

Висновки. В ході виконання дослідження реалізовано різні за складністю моделі для подовження рядів даних на основі значень схожих рядів. Перевагою такого підходу є те, що використання значень схожих рядів забезпечує збереження довгострокових та короткострокових тенденцій та коливань. Окремо слід зазначити, що найкращі моделі виявилися найпростішими в обчисленні серед розглянутих у цій роботі.

Наукова новизна полягає в застосуванні регресійного аналізу для подовження часових рядів за значеннями показників схожих рядів. Застосування такого підходу дозволяє підвищити якість побудованих прогнозів навіть при використанні простих регресійних моделей завдяки збереженню та відображенню поведінки схожих рядів на прогнозованих значеннях.

Практичне значення полягає в можливості подовження часових рядів. З використанням отриманих результатів можливо вирішити питання недостатності кількості спостережень, заповнення великих проміжків пропущених значень, приведення рядів даних до однакової довжини.

Подальші дослідження планується спрямувати на використання отриманих результатів для розробки та аналізу методів відновлення пропущених значень різної природи в часових рядах.

Список використаних джерел

- [1] Е. Ковпак, Ф. Орлов, "Порівняльний аналіз моделей машинного навчання і регресій для прогнозування ціни легкового авто", *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Економічна*, вип. 97, с. 31-40, 2019.
doi: 10.26565/2311-2379-2019-97-04.
- [2] M. S. Khan, "Water quality prediction and classification based on principal component regression and gradient boosting classifier approach", *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2021.
doi: 10.1016/j.jksuci.2021.06.003.
- [3] Assem Haytham et al., "Urban water flow and water level prediction based on deep learning", *Joint European Conf. on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*, Springer, Cham, pp. 317-329, 2017.
doi: 10.1007/978-3-319-71273-4_26.
- [4] В. Д. Дербенцев, Г. І. Великоіваненко, та Н. В. Даченко, "Застосування методів машинного навчання до прогнозування часових рядів криптовалют", *Нейронечіткі технології моделювання в економіці*, № 8, с. 66-99, 2019.
doi: 10.33111/nfmte.2019.065.
- [5] Ю. Л. Хлевна, та Ю. С. Бура, "Інформаційне забезпечення прогнозування цін на нерухомість методами машинного навчання", *Sciences of Europe*, вип. 71-1, с. 54-62, 2021.
doi: 10.24412/3162-2364-2021-71-1-54-62.
- [6] Ю. О. Андрусенко, "Аналіз основних моделей прогнозування часових рядів", *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, вип. 3 (65), с. 91-96, 2020.
doi.org/10.30748/zhups.2020.65.14.
- [7] В. А. Артеменко, и В. В. Петрович, "Повышение качества прогнозирования гидрологических временных рядов", *Автомобильні дороги і дорожнє будівництво: наук.-техн. зб.*, вип. 92, Київ: Вид-во НТУ, с. 146-127, 2014.
- [8] C. Chen, Q. Hui, Q. Pei, Y. Zhou, B. Wang, N. Lv, and J. Li, "CRML: A convolution regression model with machine learning for hydrology forecasting", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 133839-133849, 2019.
doi:10.1109/ACCESS.2019.2941234.
- [9] S. K. Jain et al., "A brief review of flood forecasting techniques and their applications", *Int. J. River Basin Manag.*, vol. 16, pp. 329-344, 2018.
doi:10.1080/15715124.2017.1411920.
- [10] Д. А. Тамбиева, Е. В. Попова, и Ш. Х. Салпагарова, "К проблеме недостаточности информации. Малые выборки или "очень короткие" временные ряды", *Политематический сетевой электрон-*

ный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, № 107, с. 126-141, 2015.

- [11] Random Forest Regressor [Online]. Available: <http://surl.li/aidsj>.
- [12] K-Neighbors Regressor. [Online]. Available: <http://surl.li/aidsk>.
- [13] SVR. [Online]. Available: <http://surl.li/aidsm>.
- [14] Gradient Boosting Regressor. [Online]. Available: <http://surl.li/aidsn>.
- [15] scikit-learn. [Online]. Available: <https://scikit-learn.org/stable/index.html>.

References

- [1] E. Kovpak, F. Orlov, "Comparative analysis of machine learning models and regressions for prediction the car price", *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina. Seriya: Ekonomichna*, iss. 97, pp. 31-40, 2019 [in Ukrainian]. doi: 10.26565/2311-2379-2019-97-04.
- [2] M. S. Khan, "Water quality prediction and classification based on principal component regression and gradient boosting classifier approach", *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2021. doi: 10.1016/j.jksuci.2021.06.003.
- [3] Assem Haytham et al., "Urban water flow and water level prediction based on deep learning", *Joint European Conf. on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*, Springer, Cham, pp. 317-329, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-71273-4_26.
- [4] V. D. Derbentsev, H. I. Velykoivanenko, and N. V. Datsenko, "Machine learning approach for forecasting cryptocurrencies time series", *Neiro-nechitki tekhnolohii modelivannia v ekonomitsi*, no. 8, pp. 65-93, 2019 [in Ukrainian]. doi: 10.33111/nfmte.2019.065.
- [5] Yu. L. Khlevna, and Yu. S. Bura, "Information software for real estate prices prediction by machine learning", *Sciences of Europe*, iss. 71-1, pp. 54-62, 2021 [in Ukrainian]. doi: 10.24412/3162-2364-2021-71-1-54-62.
- [6] Yu. O. Andrusenko, "Analysis of the basic models for forecasting time series", *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl*, iss. 3 (65), pp. 91-96, 2020 [in Ukrainian]. doi:10.30748/zhups.2020.65.14.
- [7] V. A. Artemenko, and V. V. Petrovich, "Improving the quality of forecasting of hydrological time series", *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo: sci. and techn. coll.*, iss. 92, pp. 114-127, 2014 [in Russian].
- [8] C. Chen, Q. Hui, Q. Pei, Y. Zhou, B. Wang, N. Lv, and J. Li, "CRML: A convolution regression model with machine learning for hydrology forecasting", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 133839-133849, 2019. doi:10.1109/ACCESS.2019.2941234.
- [9] S. K. Jain et al., "A brief review of flood forecasting techniques and their applications", *Int. J. River Basin Manag.*, vol. 16, pp. 329-344, 2018. doi:10.1080/15715124.2017.1411920.
- [10] Д. А. Тамбиева, Е. В. Попова, и Ш. Х. Салпагарова, "К проблеме недостаточности информации. Малые выборки или "очень короткие" временные ряды", *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, № 107, с. 126-141, 2015.
- [11] Random Forest Regressor [Online]. Available: <http://surl.li/aidsj>.
- [12] K-Neighbors Regressor. [Online]. Available: <http://surl.li/aidsk>.
- [13] SVR. [Online]. Available: <http://surl.li/aidsm>.
- [14] Gradient Boosting Regressor. [Online]. Available: <http://surl.li/aidsn>.
- [15] scikit-learn. [Online]. Available: <https://scikit-learn.org/stable/index.html>.

A. H. Baturinets,

e-mail: baturinets.anastasiya@gmail.com

S. V. Antonenko, Ph. D., Associate Professor

e-mail: svitlanav.antonenko@gmail.com

Oles Honchar Dnipro National University,

Gagarin ave., 72, Dnipro, 49010, Ukraine

LENGTHENING THE DATA SERIES BY VALUES OF SIMILAR DATA SERIES SAMPLES

The problem of insufficient information essentially influences the choice of approaches and methods of data series analysis, as well as the quality of the obtained results. Considering this problem, the authors believe that the development of such approaches and models for data series lengthening is relevant. The main task of this work is to describe and implement the technology of data series lengthening. The basis for the implementation of the technology is the use of values of similar data series as a signs for the lengthening of a certain data series represented by the same indicators, as well as similar data series. The work describes a scheme for identifying similar data series. According to this scheme, the most similar data series are those that have the smallest distance value and the strongest direct correlation, calculated between the potentially similar series and the series for which the lengthening will take place. For lengthening of the series, the work considers seven models: linear regression; sum of weighted values for a group of similar series; average weighted values for a group of similar series, with a correction to the average value of the series for which the lengthening is performed; random forest; k-nearest neighbors; support vector regression; gradient busting. The calculation experiment was carried out on the series represented by the values of water level indicators recorded at hydrological stations located in the water objects of the Dnieper River basin. For the data series of post 79545, located on the river Sluch, Novograd-Volynsky, Zhytomyr region, a lengthening by one year is carried out, i.e. the length of the series increases by 365 values. As a result, it was found that the most similar are the data series of values by the posts 79555 and 79694, which have the lowest values of the calculated distances and the value of the correlation coefficient greater than 0.75. When the series is lengthened, the best results are obtained with the use of two models: the sum of weighted values for a group of similar series and average weighted values for a group of similar series, with a correction to the average value of the series for which the lengthening is performed. In future research it is planned to use the obtained results for the development and analysis of methods for replenishment of missing values in time series.

Keywords: time series, regression, data replenishment, machine learning, sklearn, insufficient data, hydrology.