

*МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ*

**КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ
ТЕХНОЛОГІЇ:
ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО**

НАУКОВИЙ
ЖУРНАЛ



Головний редактор – професор, д.т.н., Гордєєв О.О.

№51 2023

м. Луцьк

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Головний редактор:	
професор, д.т.н. Гордеев О.О.	(м. Луцьк)
Відповідальний секретар:	
доц., к.т.н. Христинець Н.А.	(м. Луцьк)
Члени редакційної колегії:	
проф., д.т.н. Андрущак І.Є.	(м. Луцьк)
доц., к.т.н. Ліщина Н.М.	(м. Луцьк)
проф., д.пед.н. Тулашвілі Ю.Й.	(м. Луцьк)
доц., к.т.н. Ліщина В.О.	(м. Луцьк)
доц., к.т.н. Здолбіцька Н.В.	(м. Луцьк)
проф, PhD. Miłosz Marek	(Польща, м. Люблін)
проф., д.т.н. Мельник А.О.	(м. Львів)
проф., д.т.н. Мороз Б.І.	(м. Дніпро)
проф., д.т.н. Тарасенко В.П.	(м. Київ)
проф, PhD. Alison McMillan	(Великобританія)
проф, PhD. Дехтяр Ю.Д.	(Литва, м. Рига)
доц., к.т.н Мельник К.В.	(м. Луцьк)
проф., д.пед.н. Черняшук Н.Л.	(м. Луцьк)
доц., к.т.н. Костючко С.М.	(м. Луцьк)
доц., к.т.н. Дуда О.М.	(м. Тернопіль)
доц., к.т.н. Назаревич О.Б.	(м. Тернопіль)
проф., д.т.н. Сайко В.Г.	(м. Київ)
доц., к.т.н. Дуда О.М.	(м. Тернопіль)
доц., к.т.н. Ткачук А.А.	(м. Луцьк)
доц., к.т.н. Мороз С.А.	(м. Луцьк)
проф., д.т.н. Сайко В.Г.	(м. Київ)
доц., к.т.н. Євсюк М.М.	(м. Луцьк)

Адреса редколегії:

Луцький національний технічний університет,
кафедра комп'ютерної інженерії та кібербезпеки
вул. Львівська 75, ауд.141
м.Луцьк, 43018
тел. (0332) 74-61-15
E-mail: cit@lntu.edu.ua,
сайт журналу: **cit-journal.com.ua**

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ
ТЕХНОЛОГІЇ:
ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО

№51 2023р.

Журнал засновано у грудні 2010 р.
Свідоцтво про реєстрацію KB № 16705–5277 Р.
Засновник: Луцький національний технічний університет
Рекомендовано до друку Вченою радою
Луцького національного технічного університету
(протокол №12 засідання від 15.06.2023р.)
Журнал рішенням МОН України
наказом №515 від 16.05.2016р,
включено в перелік наукових фахових видань.

Видання індексується у
наукометричних та реферативних базах:
Open Academic Journals Index
Academic Resource Index ResearchBib
Rootindexing
Information Matrix for the Analysis of Journals
Ulrichsweb.

ISSN 2524-0560 (Online)
ISSN 2524-0552 (Print)

ЗМІСТ

АВТОМАТИКА ТА УПРАВЛІННЯ	
Дубук В.І, Ковівчак Я.В, Павлик Ю.Л. Розробка автоматизованої системи управління логістикою молочної продукції	5
Штокало Д.Ю., Пастернак І.І., Пастернак О.І. Розробка керованого маніпулятора для дистанційного керування літаком	18
ІНФОРМАТИКА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА	
Баранчук С.А., Бортник К.Я. Автоматизована система торгівлі на криптовалютних біржах на основі Node.js та бібліотеки React	25
Багнюк Н.В., Бортник К.Я., Лавренчук С.В, Домарацький І.В. Принцип роботи кросплатформених додатків з великими об'ємами даних з використанням бібліотеки Redux	32
Гулівата І.О., Ніколіна І.І. Цифрові інструменти у реалізації безбар'єрного освітнього середовища	37
Кардашук В.С., Бортник К.Я., Багнюк Н.В. Методи вдосконалення тестування цифрових систем	43
Лук'янюк С.В. Щодо питання хмарного електронного документообігу при виконанні науково-дослідних робіт	52
Мельник В.М., Багнюк Н.В., Бортник К.Я, Лінчук О.М. Система для ведення моніторингу web-ресурсу засобами Elasticsearch	59
Мельник К.В., Багнюк Н.В., Лавренчук С.В., Христинець Н.А., Боба Р.В., Омельчук Д.Ю. Застосування методів машинного навчання для розпізнавання облич	73
Проніна О.І., Решетников А.О. Формування нейронних мереж для вирішення задачі лінійної класифікації	79
Розломій І.О., Косенюк Г.В., Науменко С.В. Метод векторного шифрування інформації на основі використання авторського шаблону	87
Томашко А. П. Принципи моделювання системи логістичного комплексу із застосуванням машинного навчання	94
Філь Н.Ю., Кудирко О.М. Метод оцінки якості web-сайту	101

Христинець Н.А., Лавренчук С.В., Пех П.А., Євсюк М.М., Євсюк В.М., Крулік Ю.О. Функціональні адаптивні інтерфейси з динамічними компонентами для підсистем зберігання мультимедійного контенту	111
Чайковський С.Ю. Щодо питання акредитації калібрувальних та вимірювальних лабораторій: загальний аспект	116
Ямковой М.В. Математичне моделювання ланцюга поставок для вантажних перевезень у рамках логістичної системи	123
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА	
Беляков Р.О., Фесенко О.Д. Модель мобільності наземної комунікаційної мережі спеціального призначення	130
Васильківський М.В., Болдирева О.С., Варгатюк Г.Л., Грабчак Н.В. Коригування параметрів мобільних систем МІМО із використанням штучного інтелекту	139
Васильківський М.В., Нікітович Д.В., Болдирева О.С., Якубівська Н.В. Інтелектуальні технології коригування фізичного рівня мобільних мереж	148
Жеребець О.М. Порівняльний аналіз різних версій Bluetooth: переваги, недоліки	161
Обухова К.О. Безпечне віддалене підключення до ІР-камер через мережу Інтернет	168
Озерчук І.М. Bluetooth Low Energy, як основа передачі даних при надмалому енергоспоживанні	174
Пітух І.Р., Сидор А.І., Круліковський Б.Б. Дослідження характеристик пересилання електроенергії у високовольтних мережевих архітектурах в умовах динамічних впливів зовнішніх факторів	181
Рощенко О.М. Вплив електромагнітних перешкод на електронний пристрій	188

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-01>

УДК 004.031.4, 004.67, 004.94

Дубук Василь Іванович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-6339-1032>

Ковівчак Ярослав Васильович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-3905-4108>

Павлик Юрій Любомирович, бакалавр

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЛОГІСТИКОЮ МОЛОЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Дубук В.І, Ковівчак Я.В, Павлик Ю.Л. Розробка автоматизованої системи управління логістикою молочної продукції. У статті приведено розробку автоматизованої системи управління логістикою молочної продукції. Обґрунтовано актуальність розробки та практичне застосування системи. Здійснено аналіз існуючих систем управління логістикою молочної продукції. Розглянуто їх особливості, переваги і недоліки. Побудовано концептуальну модель системи управління логістикою молочної продукції. Розроблено діаграми прецедентів для класів користувачів системи. Приведено функціональну модель системи. Побудовано блок-схеми алгоритмів роботи системи. Здійснено проектування бази даних системи. Розроблено діаграму класів та діаграму компонентів для автоматизованої системи управління логістикою молочної продукції. Реалізовано компоненти системи, програмні модулі, базу даних та інтерфейс користувача. Запропонована автоматизована система управління логістикою молочної продукції уможливить покращити організацію збуту молочної продукції агропідприємствами, фермерами, виробниками, постачальниками, підприємствами торгівлі. Використання системи клієнтами підвищить зручність та зменшить час на пошук, аналіз, відбір та замовлення молочної продукції, при цьому зменшить тривалість логістичних процесів від моменту виготовлення молочної продукції до її використання споживачами.

Ключові слова: автоматизована система, логістичні процеси, управління логістикою, молочна продукція.

Dubuk V., Kovivchak Ya., Pavlyk Yu. Development of automated dairy logistics management system. The article describes the development of automated dairy logistics management system. The relevance of development and practical implementation of the system are justified. The analysis of existing automated dairy logistics management systems was carried out. The features of such systems, their advantages and imperfections are considered. The new conceptual model of the dairy logistics management system was built. Use case diagrams for the user classes are developed. The functional model of the system is presented. Flowcharts of system processing algorithms was built. The design of the system database was carried out. A class diagram and a component diagram for the automated dairy logistics management system are developed. System components, software modules, database and user interface are implemented. The proposed automated dairy logistics management system will make it possible to improve the organization of sales of dairy products by agricultural enterprises, farmers, producers, suppliers, trade enterprises. The use of the system by customers will increase convenience and reduce the time for searching, analyzing, selecting and ordering dairy products, while reducing the duration of logistics processes from the moment of production of dairy products to their use by consumers.

Keywords: automated system, logistics processes, logistics management, dairy products.

Постановка задачі. Повсякденне життя сучасної людини характеризується високим рівнем зайнятості і тому характеризується обмеженнями часу на розв'язання рутинних побутових проблем. Однією із них є організація та здійснення закупівель необхідних продуктів та товарів. Також, важливого значення набуває завдання ефективної організації здійснення закупівель та логістики продуктів у періоди пандемій хвороб, карантинних обмежень, надзвичайних ситуацій, особливих станів та інших причин.

Сучасний рівень розвитку інформаційних технологій відкриває нові можливості в організації логістики та проведенні закупівель потрібної продукції. У сучасних умовах розвитку інформаційних систем та технологій відповідні процеси підлягають автоматизації та управлінню за допомогою комп'ютера, планшета і навіть мобільного телефону. При цьому крім зручних способів здійснення пошуку, аналізу та вибору товарів також віддалено можна замовити їх доставку у необхідне місце та у визначений час. Автоматизовані системи такого класу створюють для покупців нові додаткові можливості пошуку та придбання необхідних товарів, а для підприємств дають змогу розширити коло клієнтів, оперативно реагувати на запити користувачів та мінімізувати тривалість логістичних процесів - періоди часу від виготовлення продукції до її споживання.

Особливо актуальною є задача розробки системи для організації логістики та продажу

продукції з обмеженим терміном придатності. До продукції такого типу належить молочна продукція. Корисність та цінність молока та молочних продуктів для здоров'я людини перевірена і доведена науково. Регулярне споживання молочних продуктів є необхідним, оскільки вони містять цілу низку потрібних для організму людини речовин та елементів таких як кальцій, калій, цинк, магній, йод та інші, які впливають на формування клітин головного мозку та кісткового скелету людини.

Отримані у ході дослідження авторами [1, с. 57] дані на прикладі учнів м. Харкова свідчать про недостатнє споживання дітьми молока та молочних продуктів, яке має важливе значення для підтримання здоров'я. Однак лише 43,5% дітей вживають молоко та молочні продукти щодня, що може мати несприятливі наслідки, зокрема, маса кісток зменшується на 5-10%, а також підвищується ризик розвитку захворювань опорно-рухового апарату.

Автор [2] на основі проведених досліджень вказує на важливість та корисність споживання молочної продукції для здоров'я людини.

Вчені, автори [3, с.2947] на основі методів доказової медицини доводять позитивний вплив споживання молочних продуктів на функціонування системи травлення людини.

Молочні продукти також містять вітаміни, необхідні для дітей, людей похилого віку та дорослих. Тому молочна продукція на ринку різних харчових продуктів є обов'язковим рекомендованим лікарями компонентом здорового харчування. При цьому розробка автоматизованої системи логістики молочної продукції сприятиме кращій організації відповідного ринку, підвищенню зручності замовлень продукції покупцями та позитивно впливатиме на задоволення їх споживчого попиту на молочну продукцію.

Особливо важливим компонентом для формування та ефективного функціонування ринку молочної продукції є створення додаткових можливостей для агропідприємств-виробників, переробних підприємств та фермерів для організації своєчасного збуту виготовленого асортименту молочних продуктів. Тому розробка автоматизованої системи управління логістикою молочної продукції є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальним питанням визначення, дослідження та формування логістики, як важливої функції управління підприємством присвячено науково-освітні праці вітчизняних вчених [4, 5, 6]. Визначенням, поясненням та прикладам реалізації функції логістики при дистрибуції продукції присвячена праця зарубіжних вчених [7]. Важлива науково-практична проблема оптимізації логістичного ланцюга постачання молочної продукції розв'язана та описана провідним вітчизняним вченим у [8]. Особливостям оптимізації логістичної мережі молокопродукції підприємства в умовах воєнного часу присвячено наукову працю вітчизняних вчених [9].

При цьому результати аналізу вказаних наукових досліджень і публікацій вказують на актуальність автоматизації функції логістики з використанням сучасних інформаційних систем та технологій.

В межах досліджень даної наукової праці було проведено аналіз існуючих систем-аналогів до розроблюваної, за допомогою яких реалізована автоматизація окремих задач функції логістики, а саме – реалізовано вибір, замовлення та купівлю молочної продукції.

До найбільш відомих та популярних систем подібного призначення можна віднести: системи «Агромол», «Смак традицій», «Шувар», «Галичина».

Система «Агромол» [10] використовується, як система для організації маркетингу та продажу молочної продукції, виготовленої ТОВ «Харківський молочний комбінат», м. Харків. Загальний вигляд інтерфейсу застосунку «Агромол» приведено на рис. 1.

На сьогодні, оскільки місто Харків є прифронтовим містом, в системі «Агромол» для користувачів передбачені обмежені можливості: здійснити пошук необхідного продукту; переглянути продукти по категоріям, отримати інформацію про продукти. Раніше, за допомогою даної системи також можна було здійснити й інші операції: створити персональний

кабінет; сформувати кошик замовлень; оплатити товар; організувати доставку; редагувати кошик; переглянути історію попередніх замовлень.

До переваг даної системи можна віднести: великий вибір молочної продукції, згрупованої за категоріями; простий і зрозумілий інтерфейс; наявність детальної інформації про продукти, опису їх походження, технології виробництва. До недоліків вказаної системи можна віднести ускладнену роботу з категоріями продуктів.

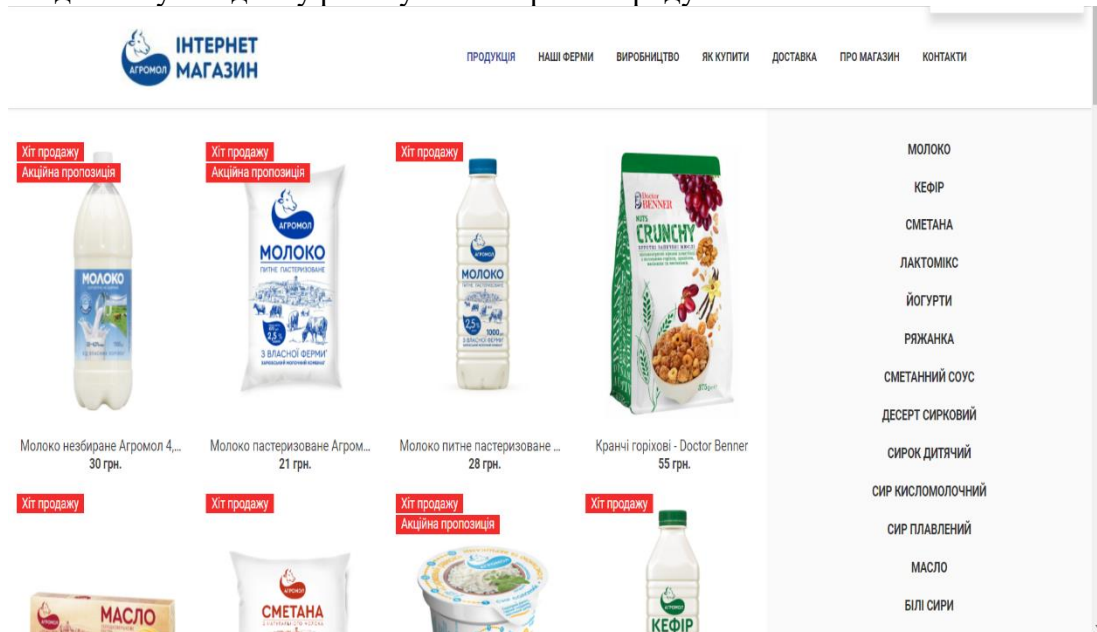


Рис. 1 – Загальний вигляд інтерфейсу системи «Агромол»

Система «Смак традицій» [11], що належить ФОП Белозор В.І. – реалізована у вигляді веб-застосунку для замовлення різних видів страв та харчових продуктів, у тому числі і молочної продукції. Інтерфейс веб-компоненти системи зображено на рис. 2.

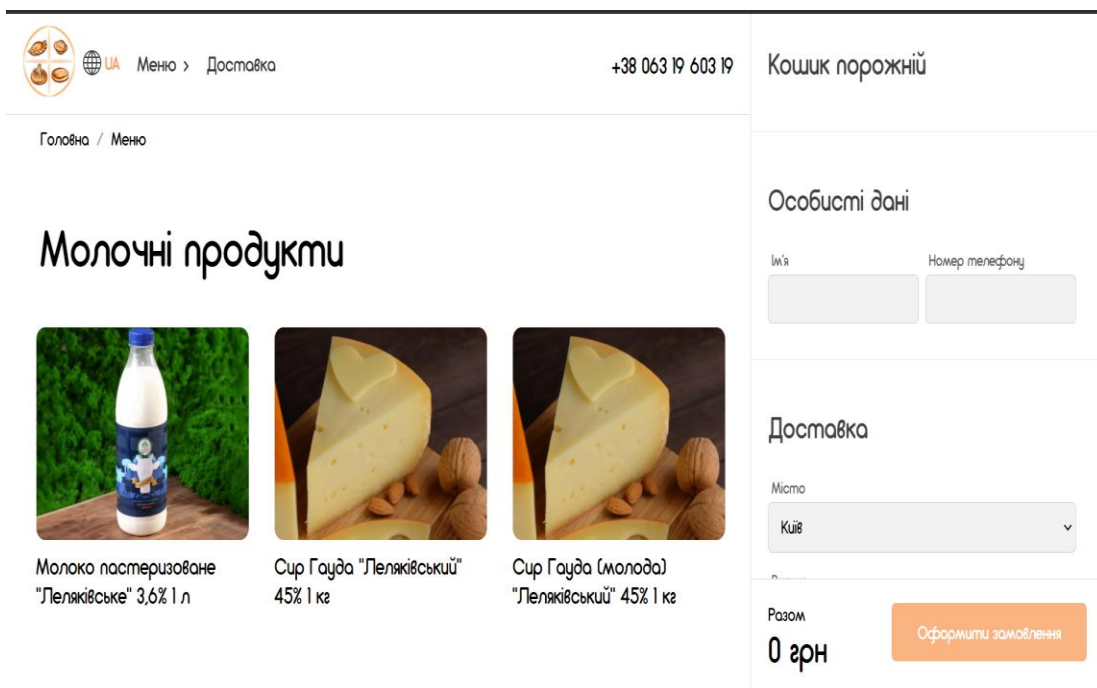


Рис. 2 – Інтерфейс системи «Смак традицій»

За допомогою аналізованої системи [11] користувач може: переглянути категорію товарів; знайти продукт; переглянути інформацію про товар; сформувати кошик замовлень; організувати доставку. Переваги системи: інтуїтивний інтерфейс; вибір зручного способу оплати; можливість додати коментар до замовлення. Недоліки: малий вибір продукції; обмежений функціонал; зручна доставка лише в межах міста Київ.

Система «Шувар» [12] призначена для здійснення замовлень різних видів продуктів, у тому числі і молочної продукції, у ТзОВ «Інтернет ринок «Шувар», м. Львів. Інтерфейс системи приведено на рис. 3.

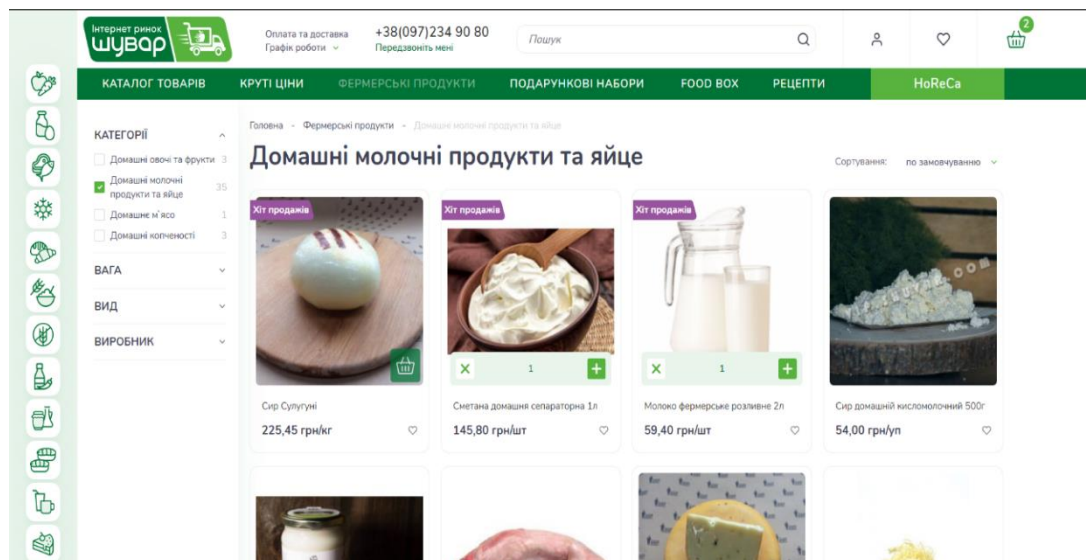


Рис. 3 – Інтерфейс системи «Шувар»

У аналізованій системі [12] користувач має можливість зареєструватися; здійснити пошук необхідного товару; сформувати кошик замовлень; редагувати кошик; придбати товар; організувати доставку; переглянути історію здійснених раніше замовлень. Перевагами системи є інтуїтивний інтерфейс і можливість організації доставки товару. До недоліків системи належать: відсутність окремої категорії молочної продукції, незручне сортування товарів та локалізація доставки придбаної продукції лише у межах Львова.

Система «Галичина» [13], що належить ТОВ «Молочна компанія «Галичина», м. Львів, призначена для здійснення замовлень різних видів молочних продуктів, організації їх вибору, замовлення покупцями. До недоліків системи належать: обмежений вибір продукції; обмежений функціонал: відсутність форми замовлення продукції, неможливість оплати на сайті; відсутність форми та журналу відгуків клієнтів, обмежена зручність доставки - лише в межах міст: Львів, Київ, Одеса, Дніпро, Івано-Франківськ; мономовний інтерфейс, що обмежує потенційну клієнтську базу та експортний потенціал продукції.

Методологічним аспектам удосконалення роботи інформаційної системи на агропідприємствах присвячено наукові дослідження словацького вченого, наведені у [14]. У напрямку удосконалення методологічної підтримки автоматизованої системи управління підприємства молочної промисловості виконані дослідження авторами [15].

Цікавим науковим дослідженням є робота авторів наукової праці [16], які розробили та описали метод використання системи «електронного носа», який успішно може використовуватися для контролю якості молока та молокопродуктів. При цьому можна припустити, що якщо розроблену авторами [16] систему інтегрувати з автоматизованою системою управління логістикою молочної продукції, то можна утворити нову комплексну автоматизовану систему з реалізованою додатковою функцією вхідного контролю якості партій продукції перед її постачанням на ринок для споживачів.

За результатами аналізу існуючих систем-аналогів було прийнято рішення розробити автоматизовану систему управління логістикою молочної продукції з наступними функціями: створення власного кабінету для користувачів; пошук необхідної продукції; сортування продукції із застосуванням фільтрів; формування кошику замовлень; надсилання листа про замовлення на електронну поштову адресу користувача; перегляду історії замовлень; для кращої організації процесів з боку підприємства - додавання та видалення продукції в системі; перегляд отриманих замовлень; формування звітів на основі статистичних даних щодо продажу продукції; побудова графіків для аналізу результатів роботи.

Метою дослідження було розроблення автоматизованої системи логістики молочної продукції.

Основна частина. У роботі розроблено концептуальну модель системи логістики молочної продукції (рис. 4).

Приведена концептуальна модель дає змогу визначити межі системи, яку необхідно розробити. Зовнішні сутності, що оточують систему, саме і визначають можливості майбутньої системи. Тому на даному етапі розробки системи важливим є визначення всіх необхідних зовнішніх сутностей, які будуть співпрацювати із системою. Таким чином можна надалі визначити функціонал майбутньої системи.

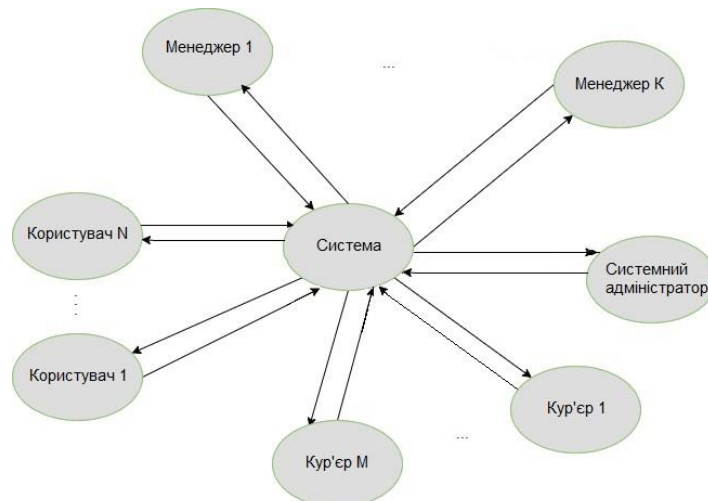


Рис. 4 – Концептуальна модель системи управління логістикою молочної продукції

У приведеній на рис. 4 концептуальній моделі визначено наступні основні зовнішні сутності: кур'єри; менеджери та системний адміністратор. Основним типом зовнішньої сутності є користувачі-покупці, які за допомогою системи здійснюють пошук, вибір та замовлення і придбання молочної продукції. Кур'єри відповідають за організацію процесу постачання придбаної продукції до місця призначення. Менеджери виконують всю рутинну внутрішню роботу, пов'язану з організацією логістики молочної продукції, а системний адміністратор - відповідає за технічну підтримку роботи системи.

Також було здійснено побудову діаграм варіантів використання для основних зовнішніх сутностей системи. Діаграма варіантів використання відображає різні можливі способи взаємодії користувача із системою. За її допомогою моделюють способи доступу користувача до функцій системи.

Діаграма варіантів використання для сутності «Користувач» приведена на рис. 5. Основні функції системи, доступ до яких отримає вказана сутність, залежать від способу використання системи. У загальному випадку, коли користувач не здійснив реєстрацію, він має обмежені можливості: зареєструватись в системі; отримати лист-підтвердження про реєстрацію в системі; здійснити пошук та перегляд товарів; отримати інформацію про товар.

Зареєстровані користувачі мають доступ до розширеного функціоналу: можуть здійснити пошук та перегляд товарів; отримати інформацію про товар; сформувати корзину замовлень; додати та видалити товар з корзини; замовити товар; організувати доставку товарів; здійснити перегляд попередніх замовлень; отримати електронний лист із замовленням.

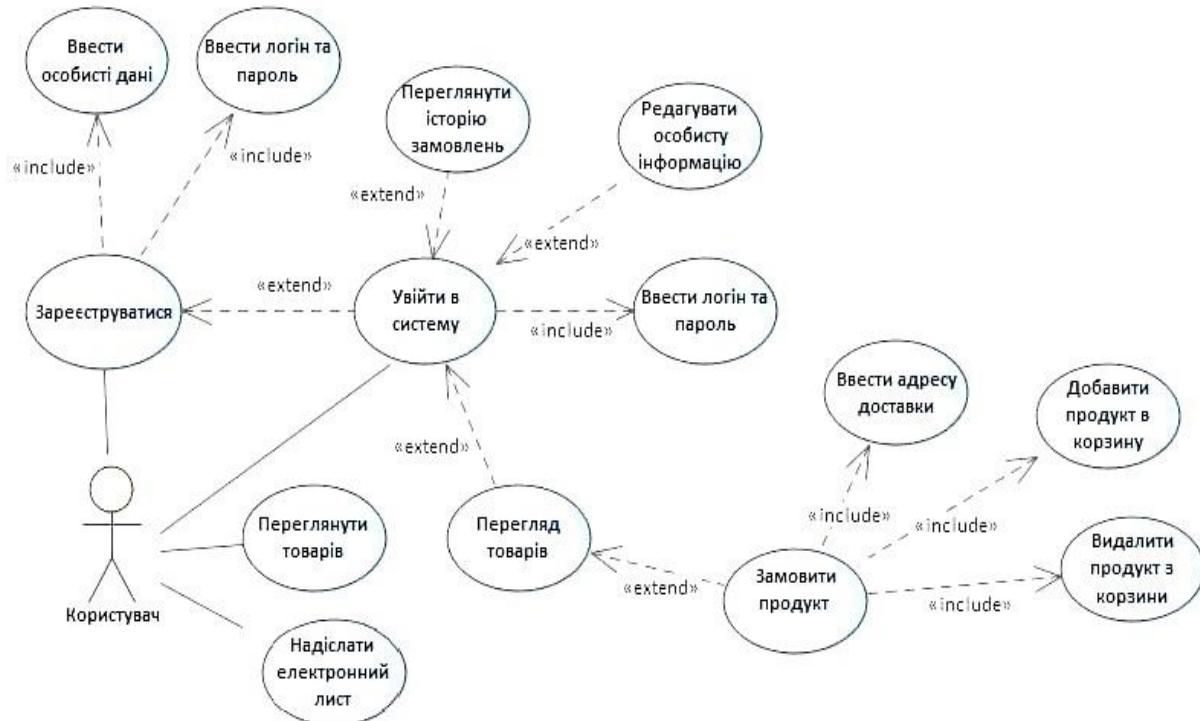


Рис. 5 – Діаграма варіантів використання системи для сутності «Користувач»

На рис. 6 зображено діаграму варіантів використання для сутності «Кур'єр». Для користувачів сутності «Кур'єр» в системі передбачено наступні можливості: отримати замовлення; відмітити виконання замовлення; переглянути список виконаних замовлень.



Рис. 6 – Діаграма варіантів використання системи для сутності «Кур'єр»

Під час проектування системи розроблено необхідний набір функціональних моделей системи з різними рівнями їх деталізації. При цьому для побудови діаграм, що представляють розроблювану систему на рівні моделей за стандартом IDEF0, було використано інструментальне середовище Ramus Educational [17].

Діаграму декомпозиції першого рівня, як відповідне графічне представлення моделі системи приведено на рис. 7.

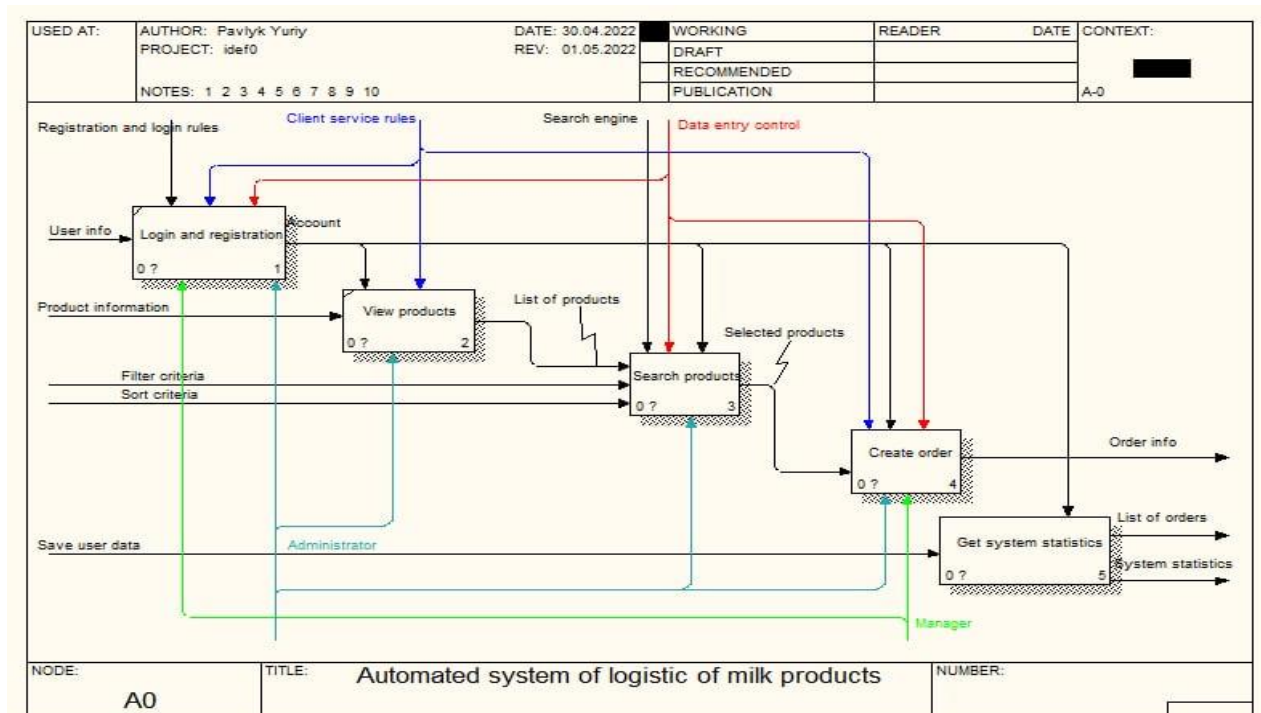
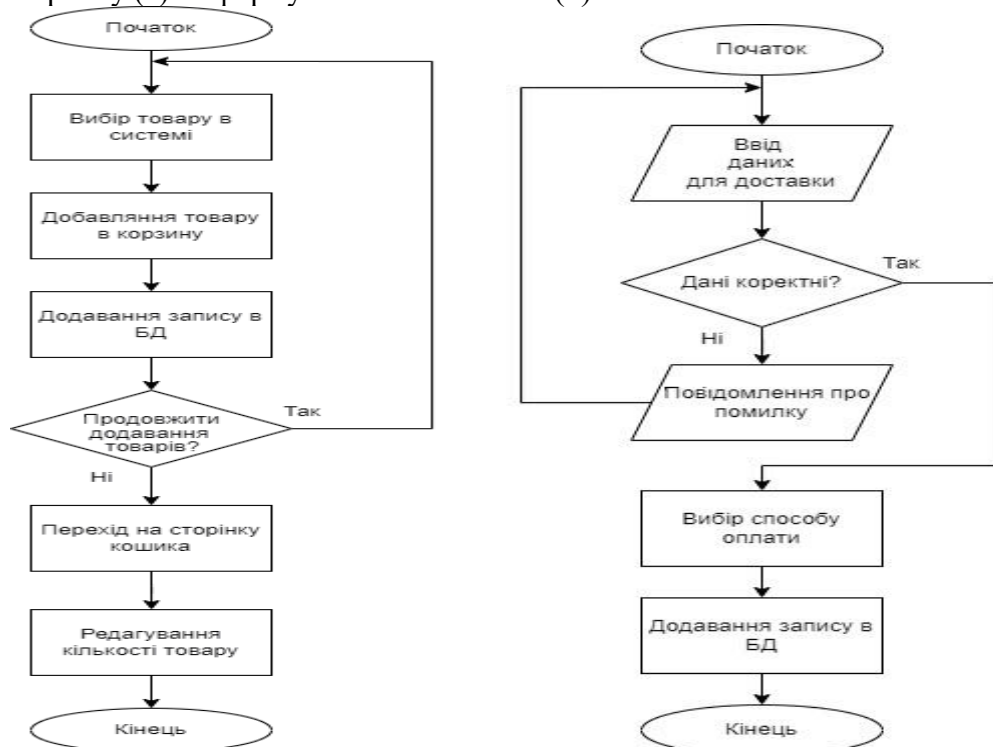


Рис. 7 – Діаграма декомпозиції першого рівня системи

За допомогою відповідної діаграми відображено модель виконання наступних функцій системи: авторизація та реєстрація в системі; перегляд продукції; пошук необхідного продукту; створення та формування замовлення; одержання статистичних даних про роботу системи.

Також було розроблено алгоритми виконання системою основних функцій.

На рис. 8 приведено блок-схеми алгоритмів процесів роботи системи: додавання товару в корзину (а) та формування замовлення (б).



а

б

Рис. 8 – Блок-схеми алгоритмів процесів роботи системи:

а - додавання товару в корзину; б - формування замовлення

У відповідності до розробленого алгоритму процесу додавання товару в корзину (рис. 8а), після перегляду товару користувач має можливість додати товар до кошика. Після виконання цього процесу у базі даних системи формується новий запис.

Наступними діями користувача можуть бути або продовження перегляду товарів та додавання їх у кошик або перехід до огляду кошика. При перегляді кошика користувач може видалити вибраний товар чи очистити весь кошик.

Для реалізації процесу формування замовлення користувач повинен ввести свої персональні дані та адресу місця доставки, а також вибрати спосіб оплати (рис. 8б). Після виконання цих дій відповідна опрацьована інформація буде введена в базу даних.

Під час розробки системи було розроблено структуру бази даних, управління якою здійснюється з використанням системи управління базами даних (СУБД).

Структуру бази даних системи приведено на рис. 9.

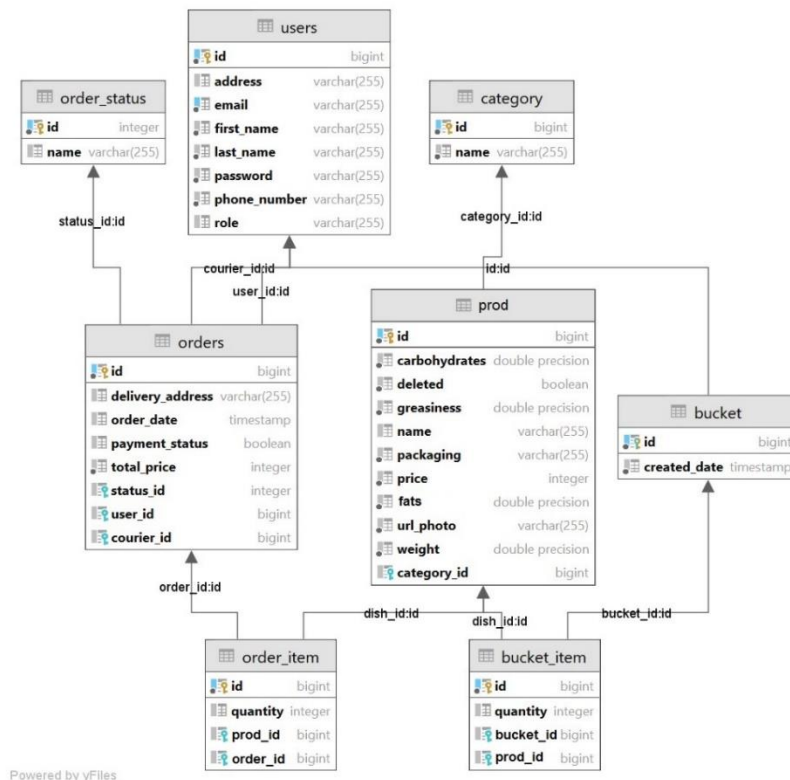


Рис. 9 – Структура бази даних системи

При проектуванні бази даних використано такі таблиці:

- users – таблиця користувачів системи;
- orders – таблиця сформованих замовлень;
- order_status – таблиця статусу замовлень;
- prod – таблиця товарів;
- category – таблиця категорій товарів;
- bucket – таблиця кошика користувача;
- bucket_item – таблиця опису кошика замовлень;
- order_item – таблиця опису замовлень.

Для виконання основних функцій в системі передбачено 8 класів: користувачі (users), замовлення (orders), продукти (prod), категорії продуктів (category), статус замовлення

(order_status), детальний опис замовлення (order_item), кошик замовлень (bucket), детальний опис кошика замовлень (bucket_item).

У результаті розробки системи для роботи з базою даних було вибрано реляційну СУБД PostgreSQL [18], яка відзначається високою продуктивністю, багатозадачністю і користується значною популярністю.

Розроблену діаграму класів системи приведено на рис. 10. За допомогою відповідної діаграми визначено склад і структуру класів, взаємозв'язки між ними та методи, які реалізують класи системи. Результати, представлені на діаграмі класів, були використані для наступного етапу проекту системи – її програмної реалізації.

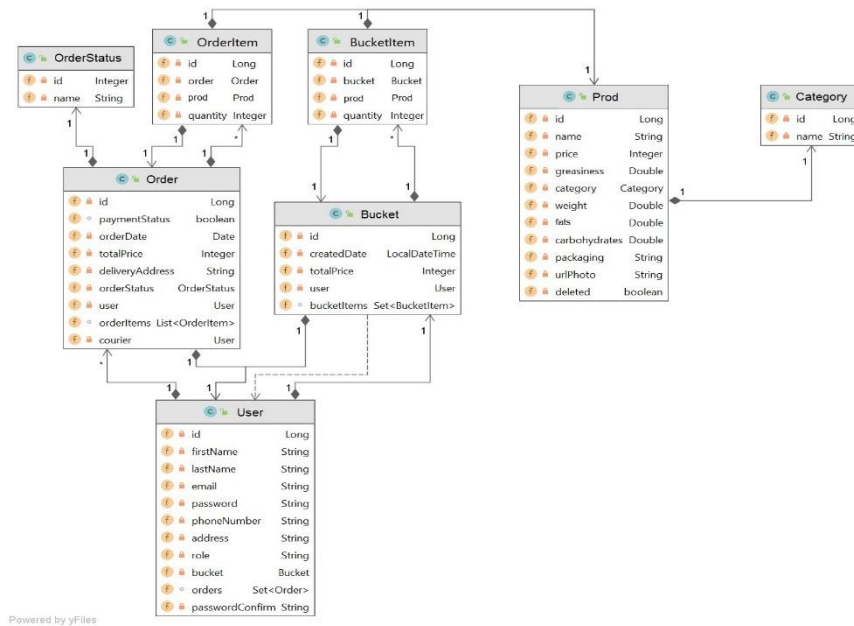


Рис. 10 – Діаграма класів системи

Здійснено реалізацію визначених компонентів системи, бази даних та інтерфейсу користувача. Діаграма компонентів системи приведена на рис. 11.

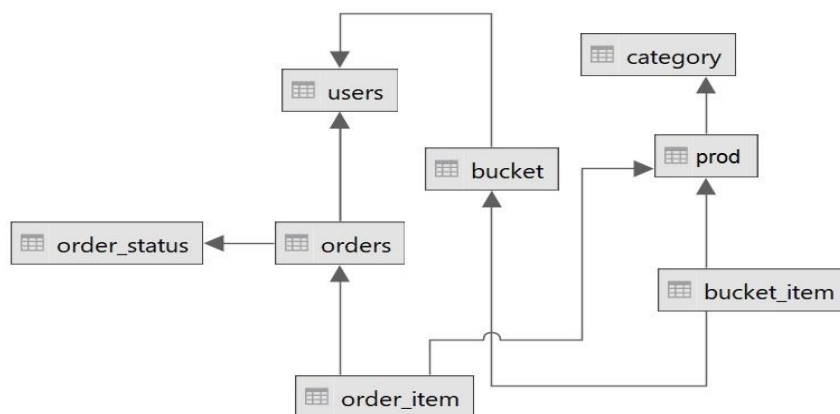


Рис. 11 – Діаграма компонентів системи

В основу роботи системи було покладено клієнт-серверну архітектуру. При цьому веб-підсистема реалізована за допомогою архітектурного шаблону «Модель-Вигляд-Контролер» (Model-View-Controller, MVC) [19]. Відповідний шаблон проектування MVC передбачає поділ програмних складових, інтерфейсу користувача та логіки керування на три компоненти: модель (M), вигляд (V) та контролер (C) – це дає змогу здійснювати модифікацію кожної з компонент незалежно.

При розробці системи було використано фреймворк Spring [20], що забезпечує реалізацію.

лізацію архітектури шаблону MVC за допомогою шаблонних готових компонентів.

Як інструментальне середовище для розробки програмного забезпечення системи було вибрано та використано IntelliJ IDEA Ultimate Edition [21].

Для реалізації клієнтської частини системи було вибрано технологію JavaServer Pages (JSP) [22], стандартну бібліотеку тегів JavaServer Pages Standard Tag Library (JSTL) [23], та використано Hyper Text Markup Language (HTML) [24], Cascading Style Sheets (CSS) [25], мову програмування JavaScript [26]. JSP дозволяє динамічно генерувати HTML, XML та різні формати веб-сторінки. Інструментальним середовищем розробки вибрано IntelliJ Idea від компанії JetBrains [21].

Для реалізації серверної частини частини інформаційної системи було вибрано мову програмування Java та технологію Server-Side JavaScript [27]. Також було вибрано та використано фреймворк Spring [20], який легко інтегрується з мовою програмування Java і є популярним серед розробників веб-застосунків.

Головна сторінка інтерфейсу користувача системи приведена на рис. 12.

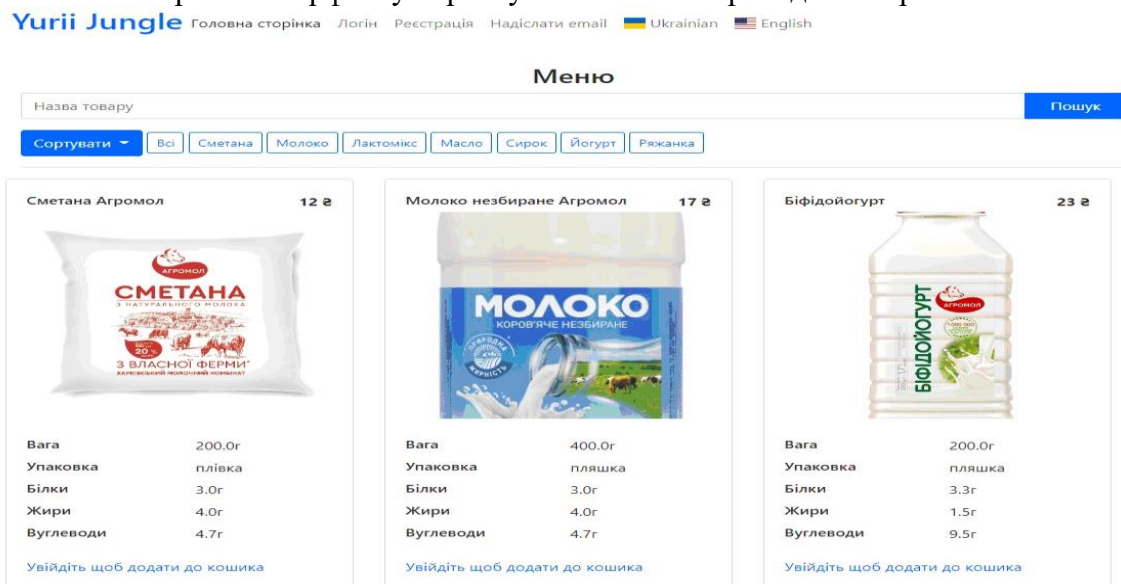


Рис. 12 – Загальний вигляд головної сторінки інтерфейсу системи

При вході на головну сторінку системи (рис.12) користувач має можливість здійснити перегляд товарів, які доступні для замовлення. Для того, щоб сформувати замовлення товарів, необхідно бути зареєстрованим та увійти в систему. У системі передбачено можливість пошуку та вибору продуктів шляхом введення їх назви. Також наявна фільтрація даних за категоріями доступних товарів або ж сортування товарів за назвою, за ціною, наприклад, за збільшенням чи зменшенням її значення.

На рис. 13 зображено форму для реєстрації користувача.

The screenshot shows a registration form titled 'Зареєструватися'. It contains the following fields:

- Ім'я: Enter firstName
- Прізвище: Enter last name (with a warning icon and text 'Please fill out this field.')
- Електронна адреса: Enter email
- Номер телефону: Enter phone number
- Адреса: Enter address
- Пароль: Enter password
- Підтвердження паролю: Confirm password

At the bottom, there is a blue button labeled 'Зареєструватися' and a link 'Маєте акаунт? Логін'.

Рис. 13 – Форма реєстрації користувача в системі

Після переходу на сторінку «Статистика» менеджер може побачити різні діаграми, а також файлове меню з набором команд (рис.14).

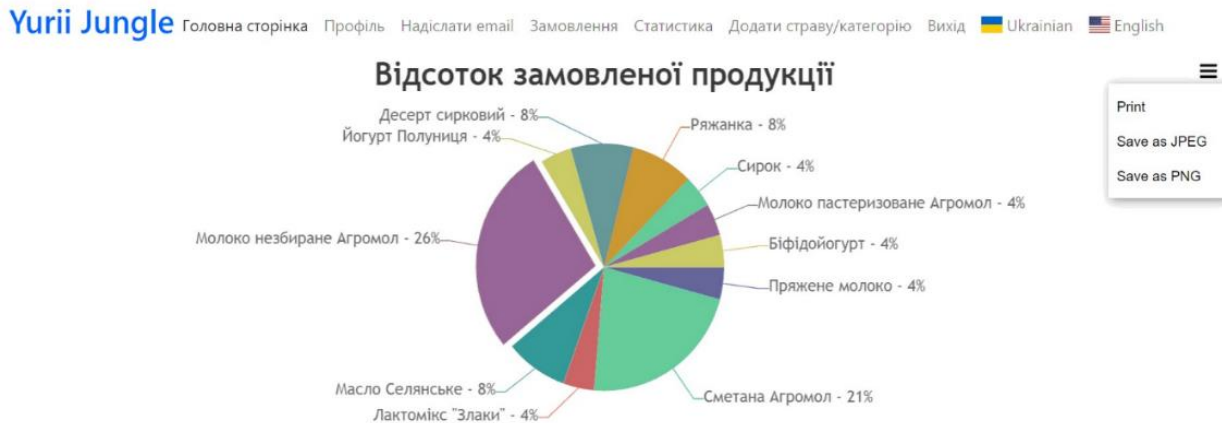


Рис. 14 – Вигляд сторінки «Статистика»

Висновки. У результаті виконання роботи було розроблено автоматизовану систему управління логістикою молочної продукції. Здійснено аналіз існуючих систем-аналогів, розглянуто їх переваги і недоліки. Побудовано необхідний набір діаграм різного рівня декомпозиції. Розроблено та проведено тестування компонентів системи, бази даних та інтерфейсу.

У системі реалізовано різні види сортування та пошуку продукції, формування замовлення, надсилання електронних листів. Менеджер може переглядати дані щодо замовлень клієнтів у вигляді графіків та діаграм, редагувати інформацію про замовлення та його статус.

Застосування на практиці запропонованої системи дасть змогу покращити управління логістикою організації збуту молочної продукції для агропідприємств-виробників, переробних підприємств та фермерів для організації своєчасного збуту заготованого чи виготовленого асортименту молочних продуктів. Розроблена система також може знайти своє ефективне застосування для автоматизації логістики інших видів продуктів і товарів.

У перспективах подальших досліджень існує можливість розширення функціоналу системи, як приклад – під'єднання до неї виробничої підсистеми контролю якості молока та молокопродуктів з метою завантаження та опрацювання даних щодо результатів контролю якості продукції, покращення реалізованого у системі функціоналу для більш зручної роботи на різних апаратних платформах.

Список бібліографічного опису

1. Меркулова Т., Пересипкіна Т., Авдієвська О., Чернякова Г. До питання організації харчування дітей в закладах загальної середньої освіти. Клінічна та профілактична медицина. 2020. Том 2, №12. С. 54-61. URL: [https://doi.org/10.31612/2616-4868.2\(12\).2020.02](https://doi.org/10.31612/2616-4868.2(12).2020.02) (дата звернення: 22.04.2023).
2. Solan M. Dairy: Health food or health risk? Harvard Health Publishing. URL: <https://www.health.harvard.edu/blog/dairy-health-food-or-health-risk-2019012515849> (date of access: 22.04.2023).
3. Liao W., Su M., Zhang D. A study on the effect of symbiotic fermented milk products on human gastrointestinal health: Double-blind randomized controlled clinical trial. Food Science & Nutrition. 2022. Vol. 10, №9. PP. 2947–2955. URL: <https://doi.org/10.1002/fsn3.2890> (date of access: 22.04.2023).
4. Брехун Н.С., Бонь, М.М. Поняття логістики як інструмента управління підприємством. Проблеми теорії та методології бухгалтерського обліку, контролю і аналізу. 2014. №3(27). С.19–35. URL: <http://pbo.ztu.edu.ua/article/view/30981> (дата звернення: 22.04.2023).
5. Крикавський Є.В., Чернописька Н.В. Логістичні системи. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. 288 с.
6. Чухрай Н.І., Гірня О.Б. Формування ланцюга поставок: питання теорії та практики: монографія. Львів: Інтеллект-Захід, 2007. 232 с.
7. Brandimarte P., Zotteri G. Introduction to Distribution Logistics. NY: J.Wiley&Sons, Inc., 2007. 579 p.

8. Алькема В.Г. Оптимізація логістичного ланцюга постачання молочної продукції. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2008. № 633: Логістика. С.13-22. URL: <https://oldena.lpnu.ua/handle/ntb/7499> (дата звернення: 21.04.2023).
9. Леонова С., Демчук І. Оптимізація логістичної мережі ТОВ 'Радивилівмолоко' на основі дослідження ринку молока та молокопродукції в умовах воєнного часу. Економіка та суспільство. 2022. №44. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-44-24> (дата звернення: 21.04.2023).
10. Свіже молоко і нічого зайвого. Агромол. URL: <http://agromol.com.ua/> (дата звернення: 22.04.2023).
11. Повністю натуральний склад продукції! Смак традицій. URL: <https://smaktradysii.com/> (дата звернення: 22.04.2023).
12. Молочне та яйця. Шувар. URL: <https://vip.shuvar.com/katalog-tovariv/molochne-ta-jajcja> (дата звернення: 22.04.2023).
13. Приєднуйся до клубу друзів Галичини. Галичина. URL: <https://dostavka.galychyna.com.ua/> (дата звернення: 22.04.2023).
14. Pataky J. Methodological aspects of an improvement of calculation information system in agricultural companies. Agricultural Economics. 2002. Vol. 48, №3. PP. 130-133. URL: <https://doi.org/10.17221/5461-AGRICECON> (date of access: 22.04.2023).
15. Akhmetova A.Ye., Abdykerova G.Zh. Improving the methodological support of management accounting systems and control costs in dairy cattle. Journal of Economic Research & Business Administration. 2018. Vol. 126, №4. PP. 227-241. URL: <https://be.kaznu.kz/index.php/math/article/view/2044>
16. Balivo A., Cipolletta S., Tudisco R., Iommelli P., Sacchi R., Genovese A. Electronic nose analysis to detect milk obtained from pasture-raised goats. Applied Sciences. 2023. Vol. 13, № 2, P. 861. URL: <https://doi.org/10.3390/app13020861> (date of access: 23.04.2023).
17. RAMUS Java-based IDEF0 & DFD Modeler. Ramus. URL: <http://ramussoftware.com/> (date of access: 23.04.2023).
18. PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database. The PostgreSQL Global Development Group. URL: <https://www.postgresql.org/> (date of access: 23.04.2023).
19. Hernandez R.D. The Model View Controller Pattern – MVC Architecture and Frameworks Explained. Freecodecamp. URL: <https://www.freecodecamp.org/news/the-model-view-controller-pattern-mvc-architecture-and-frameworks-explained/>(date of access: 23.04.2023).
20. Why Spring? Spring by VMware Tanzu. URL: <https://spring.io/why-spring> (date of access: 23.04.2023).
21. IntelliJ IDEA – the Leading Java and Kotlin IDE. JetBrains. URL: <https://www.jetbrains.com/idea/> (date of access: 22.04.2023).
22. JavaServer Pages Technology. Oracle. URL: <https://www.oracle.com/java/technologies/jspt.html> (date of access: 21.04.2023).
23. JavaServer Pages Standard Tag Library. Oracle. URL: <https://www.oracle.com/java/technologies/jstl.html> (date of access: 21.04.2023).
24. HTML: HyperText Markup Language. Mozilla. URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTML> (date of access: 21.04.2023).
25. Lie H.W., Bos B. Cascading Style Sheets: Designing for the Web. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley, 2005. 392 p.
26. JavaScript. Mozilla. URL: <https://developer.mozilla.org/ru/docs/Web/javascript> (date of access: 21.04.2023).
27. Server-Side JavaScript Guide. Oracle. URL: <https://docs.oracle.com/cd/E19957-01/816-6411-10/contents.htm> (date of access: 22.04.2023).

References

1. Merkulova, T., Peresypkina, T., Avdiievska, O., & Cherniakova, H. (2020). To the question of organisation school feeding. Clinical and Preventive Medicine, 2(12), 54-61. [https://doi.org/10.31612/2616-4868.2\(12\).2020.02](https://doi.org/10.31612/2616-4868.2(12).2020.02)
2. Solan, M. (2019, January 25). Dairy: Health food or health risk? Harvard Health Publishing. <https://www.health.harvard.edu/blog/dairy-health-food-or-health-risk-2019012515849>
3. Liao, W., Su, M., Zhang, D. (2022). A study on the effect of symbiotic fermented milk products on human gastrointestinal health: Double-blind randomized controlled clinical trial. Food Science & Nutrition, 10 (9), 2947-2955. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2890>
4. Brohun, N.S. & Bon', M.M. (2014). Concept of logistic as instrument of management an enterprise. Problems of theory and methodology of accounting, control and analysis, 3(27), 19-35. <http://pbo.ztu.edu.ua/article/view/30981>
5. Krykavskiy, Ye. V. & Chornopyska, N.V. (2019). Logistics Systems. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 288.
6. Chukhrai, N. I. & Hirna, O. B. (2007). Supply Chain Forming: Questions of Theory and Practice: Monograph. Lviv: Intellect-Zahid, 232.
7. Brandimarte, P., & Zotteri, G. (2007). Introduction to Distribution Logistics. J. Wiley & Sons, Inc., 579.
8. Alkema, V.H. (2008). Optimisation of logistics chain of dairy products supply. Herald of National University «Lviv Polytechnic», 633: Logistics, 13-22. <https://oldena.lpnu.ua/handle/ntb/7499>
9. Leonova, S., & Demchuk, I. (2022). Optimization of the logistics network of 'Radyvylivmoloko' LLC on the basis of a research of the milk and dairy products market in wartime conditions. Economy and Society, (44). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-44-24>
10. Agromol. (2023). Fresh milk and nothing else. <http://agromol.com.ua/>
11. Smak tradysii. (2023). Fully natural contents of production! <https://smaktradysii.com/>
12. Shuvar. (2023). Dairy Products and Eggs. <https://vip.shuvar.com/katalog-tovariv/molochne-ta-jajcja>
13. Galychyna. (2023). Join the club of Galychyna friends. <https://dostavka.galychyna.com.ua/>
14. Pataky, J. (2002). Methodological aspects of an improvement of calculation information system in agricultural companies. Agricultural Economics, 48(3), 130-133. <https://doi.org/10.17221/5461-AGRICECON>

15. Akhmetova, A.Ye., & Abdykeroova, G.Zh. (2018). Improving the methodological support of management accounting systems and control costs in dairy cattle. *Journal of Economic Research & Business Administration*, 126(4), 227-241. <https://be.kaznu.kz/index.php/math/article/view/2044>
16. Balivo, A., Cipolletta, S., Tudisco, R., Iommelli, P., Sacchi, R., Genovese, A. (2023). Electronic nose analysis to detect milk obtained from pasture-raised goats. *Applied Sciences*, 13(2), 861. <https://doi.org/10.3390/app13020861>
17. Ramus. (2023). RAMUS Java-based IDEF0 & DFD Modeler. <http://ramussoftware.com/>
18. The PostgreSQL Global Development Group. (2023). PostgreSQL: The World's Most Advanced Open Source Relational Database. <https://www.postgresql.org/>
19. Hernandez R.D. (2021, April 19). The Model View Controller Pattern – MVC Architecture and Frameworks Explained. *Freecodecamp*. <https://www.freecodecamp.org/news/the-model-view-controller-pattern-mvc-architecture-and-frameworks-explained/>
20. Spring by VMware Tanzu. (2023). Why Spring? <https://spring.io/why-spring>
21. JetBrains. (2023). IntelliJ IDEA – the Leading Java and Kotlin IDE. <https://www.jetbrains.com/idea/>
22. Oracle. (2023). JavaServer Pages Technology. <https://www.oracle.com/java/technologies/jspt.html>
23. Oracle. (2023). JavaServer Pages Standard Tag Library. <https://www.oracle.com/java/technologies/jstl.html>
24. Mozilla. (2023). HTML: HyperText Markup Language. <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTML>
25. Lie, H. W., & Bos, B. (2005). *Cascading style sheets: Designing for the Web*. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley Professional, 392. https://books.google.com/books?id=fIMhmQEACAAJ&source=gb_book_other_versions
26. Mozilla. (2023). JavaScript. <https://developer.mozilla.org/ru/docs/Web/javascript>
27. Oracle. (2023). Server-Side JavaScript Guide. <https://docs.oracle.com/cd/E19957-01/816-6411-10/contents.htm>

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-02>

УДК 629.7

Штокало Данило Юрійович¹, студент,

<https://orcid.org/0000-0003-0558-874X>

Пастернак Ірина Ігорівна¹, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0001-7261-3189>

Пастернак Олег Ігорович², адміністратор

<https://orcid.org/0009-0005-6060-8709>

¹ Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

² SoftServe, Automation Administrator, м. Львів, Україна

DEVELOPMENT OF A CONTROLLED MANIPULATOR FOR REMOTE CONTROL OF AN AIRCRAFT

Shtokalo D., Pasternak I., Pasternak O. Development of a controlled manipulator for remote control of an aircraft.

The goal of this work is to develop the controlling manipulator for the remote control of fixed wing aircraft. It consists of the mechanical part of manipulator, it's electronics and software written for the microcontrollers. This paper describes the process of developing controlling manipulator using 3D printing technologies for mechanical part and creating a flexible software for microcontrollers which will be relevant and easy to maintain and recreate in the future. The technologies used in the development process, the materials and part manufacturing process, the software libraries were integrated into the project, the main approaches to software development, as well as an explanation of why this particular stack of technologies and engineering decisions were preferred for the implementation of this project have been described. To make sure that developed system meets its requirements it has been tested for its practical use cases.

Keywords: human interface device, 3D modeling, CAD software, 3D printing, microcontroller, Hall effect sensor, wireless communication, C.

Штокало Д.Ю., Пастернак І.І., Пастернак О.І. Розробка керованого маніпулятора для дистанційного керування літаком. Метою даної роботи є розробка керованого маніпулятора для дистанційного керування літальними апаратами. Він складається з механічної частини маніпулятора, його електроніки та програмного забезпечення, написаного для мікроконтролерів. У цьому документі описано процес розробки керованого маніпулятора з використанням технологій 3D-друку для механічної частини та створення гнучкого програмного забезпечення для мікроконтролерів, яке буде актуальним і простим в обслуговуванні та відтворенні в майбутньому. Технології, які використовуються в процесі розробки, матеріали та процес виготовлення деталей, бібліотеки програмного забезпечення були інтегровані в проект, основні підходи до розробки програмного забезпечення, а також пояснення, чому саме цьому пакету технологій та інженерних рішень було віддано перевагу для описаної реалізації цього проекту. Щоб переконатися, що розроблена система відповідає поставленим вимогам, її було протестовано для практичних випадків використання.

Ключові слова: пристрій людського інтерфейсу, 3D моделювання, програмне забезпечення САПР, 3D друк, мікроконтролер, датчик Холла, бездротовий зв'язок, C.

Introduction. Nowadays in modern battlefield a huge role is dedicated to an unmanned aircrafts. Those aircraft serve a huge role in modern combat, having mainly several roles such as reconnaissance and precise strikes. Developing and implementing such systems can save human lives, ammunitions and economical resources. Though such devices are not just aircrafts by itself. In order to be effective it has to be a whole system which consists of controlling, communication, maintenance, competent crew, optics, and weapon system if such is needed. This paper describes the control part of those systems. With a rapid development of those machines there appeared a demand to have a comfortable and precise control of such vehicles. Human interface devices can be used for multiple roles like for training crew in simulators or for controlling an aircraft directly. A controlling manipulator (joystick) can be used not just for controlling aircrafts but also for training crew. So developing such joystick can be very useful for practicing aircraft flying skills.

To be able to use joystick in flying simulators it has to be a Human Interface Device. The Human Interface Device (HID) [1] class was originally targeted at human interface devices; however, HID is very useful for any application that requires low-latency input-output operations to an external interface, and the ability for that device to describe itself. Many typical HID class devices include indicators, specialized displays, audio feedback, and force or tactile feedback. Therefore, the HID class definition includes support for various types of output directed to the end user. HID enables initialization, and control of self-describing devices.

So since it is a device that human interacts with, it has to be a physical object. Such object can be made using a 3D modeling. 3D modeling, which is the process of developing the mathematical representation of a three-dimensional object through special software [2] is widely used in the fields of

© Штокало Д.Ю., Пастернак І.І., Пастернак О.І.

cinema, advertising, medicine, industry, engineering, forensics, architecture, games, culture and education. The widespread use of 3D printer technology in industry and education settings and decreased costs of 3D printing technologies in recent years push up the interest in 3D design and modeling technologies.

To create a controller manipulator it is necessary to make a mechanical parts of a device. For designing of those parts a computer-aided (CAD) design software were used. Since for manufacturing of those parts a 3D printing technology were used it was necessary to use CAD software to create a mechanical parts. The manufactured objects that surround us in everyday life are represented programmatically in CAD software as a sequence of 2D and 3D modeling operations. Parametric CAD files contain programmatic information that is critical for documenting design intent, maintaining editability, and compatibility with downstream simulation and manufacturing. Embedded within these designs is the knowledge of domain experts who precisely define a sequence of modeling operations to form 3D shapes. We believe having access to a real-world collection of human design sequences, and the ability to execute them, is critical for future advances in CAD that leverage learning-based approaches [3].

3D printing, commonly known as additive manufacturing technology, is a practice of making three dimensional objects through layer by layer printing. 3D printing technology is an interdisciplinary technology which includes machinery, computer technique, numerical control, material technology. Usually, the process of 3D printing contains three steps: firstly, the design of the 3D models using CAD software; secondly, the 3D model being cut into slices; finally, printing the model layer by layer. Thus, in theory, any complex three-dimensional model could be fabricated by 3D printing technique. The applications of 3D printing have expanded not only covering traditional manufacturing but also electronics, medical and other industries. 3D printer can print almost any item ranging from small thing such as jewelry, toy, gadget, teeth to large one such as engine, car, house and so on [4]. And in our case it is the only option to create a physical model for the manipulator.

In order to read the sensors data, process it and send to machine a microcontrollers were used. Microcontrollers are used in automatically controlled products and devices, since they make easier to digitally control devices and processes, reducing at the same time the cost and the size of the embedded control system as a whole. Today there exists a rapid development of such systems towards intelligent control units [5].

In order to detect rotation of axis a Hall effect sensors were used. The main principle of this sensor is that it can detect the presence and magnitude of a magnetic field. In our particular case a linear Hall effect sensor is needed since its output depends on polarity of magnet field which can be achieved by placing a sensor between north and south pole of two magnets and rotating it around axis.

One of the parts that can improve usability of the controller is the aspect of being wireless. Without spare cables it is more simple to setup, transport and maintain and use the device. Wireless communication will be between two microcontrollers, where one is connected to a PC and is used as HID device and another is for reading signals from sensors and buttons.

The software part of the system is written in C-like programming language that is called Arduino programming language and it is used in Arduino IDE.

Problem statement. So to have the unmanned aerial vehicle (UAV) to operate effectively the operating crew should be really competent and well trained. To do their tasks effectively a crew should be able to quickly detect any problem and to solve it as quickly as possible. Since in air it is the matter of seconds between life and death. For example when you performing reconnaissance task and signal is starting to lose. First of all you as a pilot should notice that, and then make a maneuver depending on situation. And if pilot would not notice that problem then he can easily loose an expensive equipment and what is worse he would fail the task, which could lead to a devastating consequences. And there are a lot of such situation when pilot have to quickly detect problem, make a right decision and act accordingly.

But to have such skills a pilot should be training a lot. But training not just in theory but on practice. And with a lot of practise it would be much easier and effective to perform the real tasks. Though it would be too expensive for newbie pilots to train on real UAV's, since without a lot of experience it would be much easier to damage or destroy an aircraft because of human error.

In this case to not damage expensive equipment there are special simulator software that simulates a real model and behaviour of an aircraft, where pilots can improve their flying skills. Usually such software runs on personal computers (PC). Also there is a problem that common PC does not have any input control as the aircraft does.

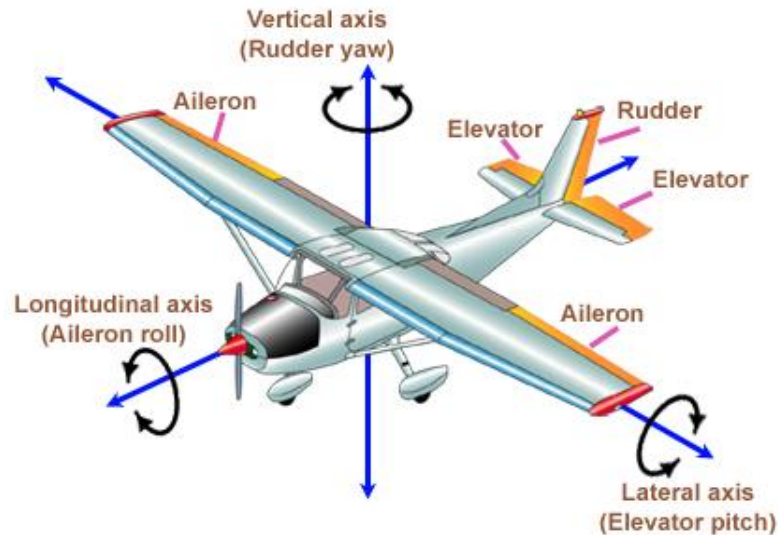


Fig. 1 – Main controls of an aircraft

So in this article a special universal input device that can be used for training and other purposes were made. Such a device should have the same control that common aircraft has. Usually common aircraft has four main controls. The elevator for controlling an elevation pitch, the ailerons for controlling an aileron roll, a rudder for controlling the rudder yaw, and the thrust lever to control the power of the motor (see Fig. 1). And for each part there is separate control units: joystick for aileron and elevator control; a pedals for rudder control; a thrust lever for controlling the power of the motor.

Purpose of the work. The purpose of this work is to create a controller device to imitate a real aircraft controls. This device should be able to be recognized as a HID device, so it can be used in flying simulation software. The device should have three main components.

Joystick for controlling pitch and roll with additional custom programmed buttons;

Pedals for controlling yaw;

Thrust lever for controlling power of the motor with additional custom programmed buttons;

Those parts are used as user input and information from sensors and buttons of those parts should be sent to a microcontroller that is connected to a PC. A data from user input parts should be sent wirelessly. In this case we achieve mobility and modularity of the device which makes it easier to setup, maintain, upgrade and use.

Created device can serve a multiple roles. First of all it is made for training aircraft pilots. But since flying by itself is quite exciting and interesting the device can also serve a role for entertainment. Since there are a lot of video games that includes flying an aircraft vehicle in it's gamepaly.

Chose of elements for implementation. To implement this controlling device it is needed to chose the components for implementation. This choice depends on availability, price, and technical parameters of each part. Basically what do we need is a main sensors to detect the position of each axis, and a microcontroller which can transmit a data from those sensors to the PC. But there is also wireless part that is need to be considered. So to make this device it is needed at least two microcontrollers: one for reading data from sensors, and another to put data into PC.

For the microcontroller for reading sensors data the Arduino Nano microcontroller board was chosen. Arduino is an open-source platform arranged in a simple microcontroller board. The Arduino is designed to be easy to use and it has its programming language called as the Arduino programming language. Arduino has the advantages of being able to connect with a computer easily through the USB port [6]. Arduino can also combine with other components such as the transceiver NRF24L01 which will be used for wireless communication between two microcontrollers. This board uses the ATmega328P microprocessor. It has 32kB of flash memory, 1kB of EEPROM and 2kB of RAM. It operates on a two stage pipeline with fetch and execution stages: the next instruction is fetched during execution of the current instruction. It's processor runs at 4 MHz [7]. Another important point is the availability of Analog-to-digital converter (ADC). Arduino has 6 on-board ADC channels which can be used to read analog signal in the range 0-5V. It has 10-bit ADC means it will give digital value in the range of 0 – 1023 (2^{10}). This is called

as resolution which indicates the number of discrete values it can produce over the range of analog values [8].

Second microcontroller should have a HID compatability. But it would also be quite convinient if it would have the same IDE for it's programming. Such microcontroller have been found and it is Arduino Pro Micro wich ATmega32U4 microprocessor. It has basically the same specifications as previous ATmega328P, but it can be used as HID device.

To chose a sensor for detecting an axis position the two specification need to be considered, a precision of sensor and reliability. So there are two types to chose: a potentiometer type sensor or a Hall effect sensor. Since potentiometers are partially mechanical, and can there is higher possibility of them to malfunction, a Hall effect sensor was chosen. So AH49E linear Hall effect sensor was chosen for this part of system.

Communication between microcontrollers is provided with the help of NRF24L01 module mentioned before. It uses the 2.4 GHz band and it can operate with baud rates from 250 kbps up to 2 Mbps. If used in open space and with lower baud rate its range can reach up to 100 meters. The module can use 125 different channels which gives a possibility to have a network of 125 independently working modems in one place. Each channel can have up to 6 addresses, or each unit can communicate with up to 6 other units at the same time. The power consumption of this module is just around 12mA during transmission. The operating voltage of the module is from 1.9 to 3.6V. This system needs two modules, one for transmitter to transmit data from sensors and one as receiver to get data from transmitting module.

Development of the mechanical part. The main part of the device are it's mechanics. As it was said before the device should imitate an aircraft controls. And there are basically three main mechanical parts to implement. And those parts are joystick, pedals, and thrust lever.

The joystick part is the most complicated one because it has to be a lever that can move on two axis. More than that this joystick should be always centered at zero position. So to model such mechanism a CAD software Fusion 360 was used. Other than just rotating around two axis the joystick rotation angle should not exceed 30 degrees. For that purpose there are special limiters in design that prevent moving the joystick to an angle of more than 30 degrees. Another thins to be considered is how to attach the Hall sensors and magnets for them. And also there should be enough space to wire everything up. To center joystick on all two axis a spring mechanism should be used. Last but not least thing to be considered that every part should be able to be printed on a 3D printer. So considering those important input parameters the needed model was designed (see Fig. 2). At the top of this model there is an adaptor to attach different handles.

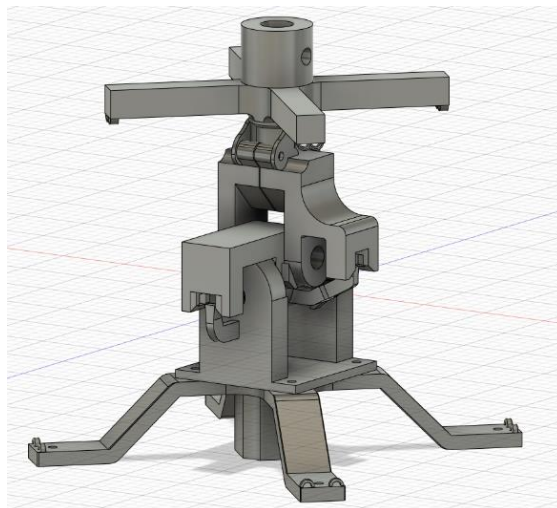


Fig. 2 – The model of joystick developed in CAD software

Making a pedals was an easier task since it has only one axis. But there also should be a limiter for axis angle. And pedals should also be returned to a zero position by itself. But apart from this there are no special requirements for pedals.

A thrust lever though was not so easy to create since there is one catch in this part. It should stay in the position that user left it in. And this task is a bit complicated mechanically since the handle there is quite big and would me moved by gravity force. So it was decided to use traction force in order to prevent

lever from moving by itself. To implement this there are several plates in a rotor part that causes a traction to a mechanism (see Fig. 3).

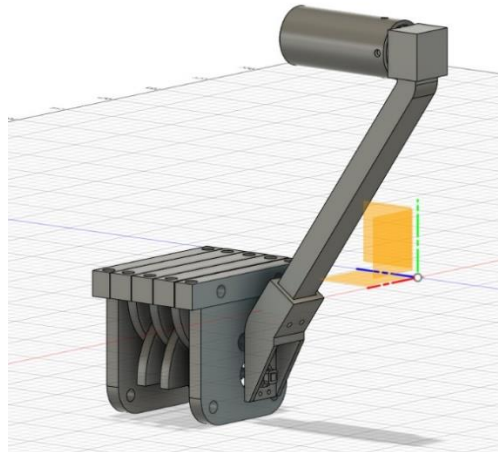


Fig. 3 – The model of thrust lever developed in CAD software

Development of the hardware part. Generally speaking to create a hardware part every electronic component has to be connected together. As it was said before there are two microcontrollers (Arduino Nano and Arduino Pro Micro), two wireless communication modules NRF24L01, four Hall effect sensors AH49E, and four buttons. The schematics of the device can be seen at Fig. 4. Also one thing that was not mentioned that is the NRF24L01 module voltage level is 3,3 volts. But the Arduino Pro Micro does not have such output. So a simple voltage step-down circuit was used. This circuit uses the LM1117 linear voltage regulator.

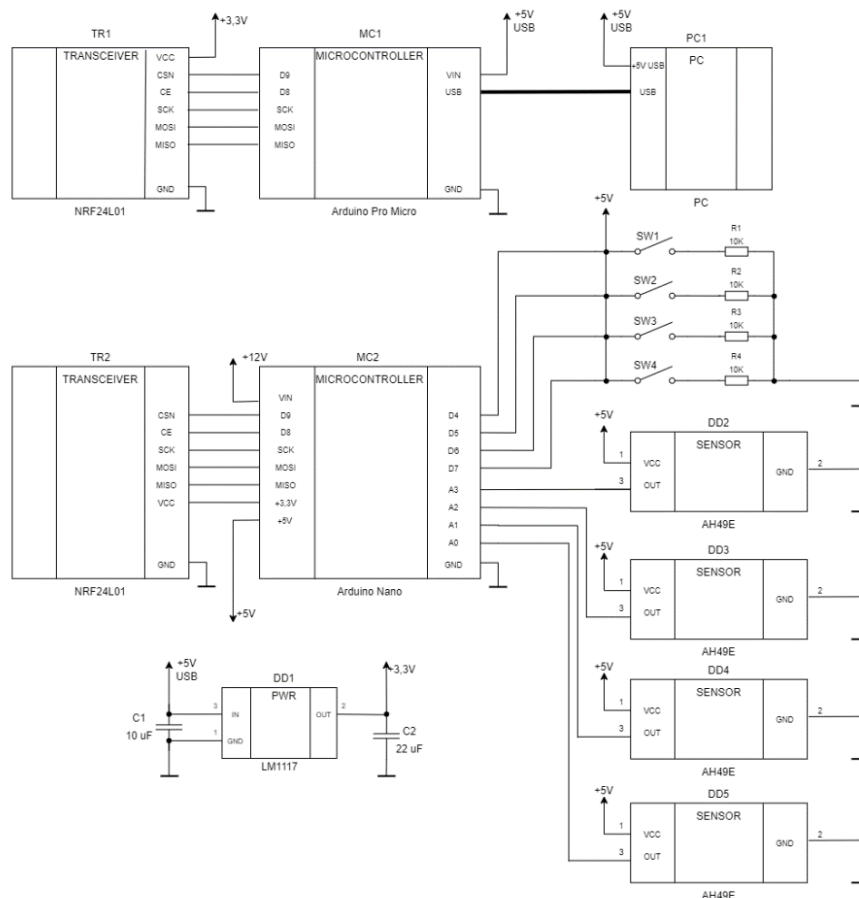


Fig. 4 – Schematics for the hardware part

Development of the software part. The software part in this system consist of two parts. First part is for the microcontroller thar reads data from sensors and buttons, and second part is for receiving those data and sending it to a PC. Communication between those two parts happens with help of module NRF24L01 which uses Serial Peripheral Interface (SPI) to communicate with the microcontroller. But in order to not invent a bicycle a few libraries for this specific module are used. Those are SPI.h, nRF24L01.h and RF24.h.

Transmitted data is formed into array of four integer values. Each integer is responsible for each axis. Since the size of integer in C language is 16 bits, they were divided in the next structure. Each of those integer consists of 2 bits for axis, 4 bits for buttons status, and last 10 bits are for axis value (see Fig. 5). First two bits are to detect for which axis the value is. Since there are only four axis, two bits would be enough to mark every axis. Next four bits are for buttons statuses. So it is logically that it is possible to have up to 16 buttons. Axis value has 10 bits because microcontrollers ADC has 10 bit resolution.

So to transmit this data it is firstly is read with analogRead() and digitalRead() method. Then received data is packed into each integer of the array. It is done using simple logical operations like AND. For example a T-axis has value 555 (0000 0010 0010 1011), and no button is pressed (0000). And also T-axis is marked as -16 384 (1100 0000 0000 0000). Then using logical AND we combine this data into one integer. And then we have our data for one axis, which is -15 829 (1100 0010 0010 1011). Using this simple actions for each axis a complete data package would be ready to be sent. The next step would be to send this data, using method send() from nRF24L01.h library.

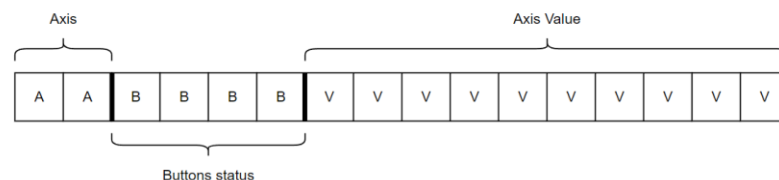


Fig. 5 – Data structure for one axis

At the other end of this system a data should be read, unpacked from integer array, and sent to a PC. To send data as from a HID device a library Joystick.h. was used. This library allows to easily set up a multiple axis and buttons, depending on user needs [9].

Testing the device. In the testing of this device there should be considered several aspects. First of all it has to flawlessly do whatever it designed to be doing. To be exactly it is a work four axis movement, correct buttons pressing, and to be recognizable in the operation system as a HID device. To test this there is a special utility in Windows 10. As we can see at the Fig. 6 the device is detected successfully, and it has all four axis and four buttons.

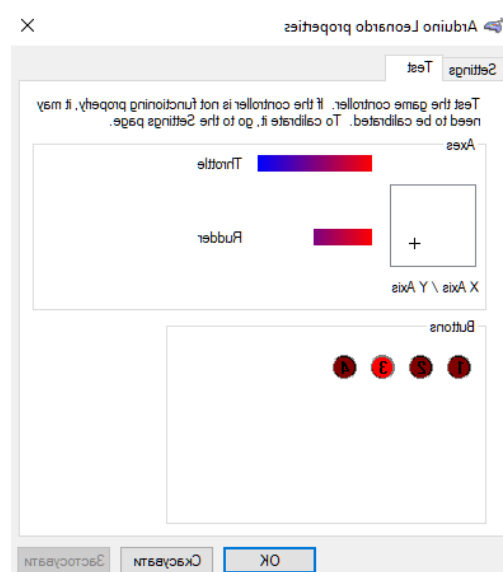


Fig. 6 – Testing the controller using Windows utilities

Another thing that has to be tested is a comfortability of usage. Having used a controller for a brief period of time, it was a pleasant experience to use it. But since this aspect is very personal to each human it is hard task to test it.

Conclusion. As a result of this work, a controlled manipulator for controlling an aircraft was created. Created manipulator can be used as a tool for a flying practice and for an entertainment. It's main advantage is possibility to be customizable and upgradable. The elements for implementation were chosen considering a reliability, availability on current market, price, and simplicity of a development. The mechanical parts were designed considering specificity of the task, where roll, pitch and rudder axis has a 30 degrees of movement. The hardware part was made from chosen elements to satisfy the needs for wireless communication and sensors precision. The precision for each axis is 10 bit. For this hardware a software were written, using publicly available libraries. Created software can support 4 axis with 10 bit precision and support up to 16 custom programmed buttons. Everything was tested in order to check the created device. At the end device turned out to be a finished work with possibility to improve it further.

References

1. Ranta, C. and McGowan, S. *et al.* (2003). "Bluetooth HID Profile", *Technical report*. [Electronic resource]. – Access mode: http://www.dawidurbanski.pl/public/download/projekty/bluepad/HID_SPEC_V10.pdf. (Accessed: May 22 2022).
2. Benzer, AI, Yildiz, B. *et al.* (2019). "The effect of computer-aided 3D modeling activities on pre-service teachers' spatial abilities and attitudes towards 3D modeling", *Journal of Baltic Science Education*, 336, pp. 335–348. doi: 10.33225/jbse/19.18.335
3. Karl D.D. Willis, Yewen Pu. *et al.* (2021). "Fusion 360 Gallery: A Dataset and Environment for Programmatic CAD Construction from Human Design Sequences", *ACM Transactions on Graphics*, 2, pp. 1–24. doi: 10.1145/3450626.3459818.
4. Quan, H., Zhang, T., Xu, H., Luo, S., Nie, J., Zhu, X. *et al.* (2020). "Photo-curing 3D printing technique and its challenges", *Bioactive Materials*, 111, pp. 110–115 doi: 10.1016/j.bioactmat.2019.12.003.
5. George K. Adam *et al.* (2018). "Embedded Microcontroller with a CCD Camera as a Digital Lighting Control System", *Electronics*, doi: 10.1109/ISSRE.2016.25.
6. E. S. B. Santosa and S. Waluyanti *et al.* (2019). "Teaching Microcontrollers using Arduino Nano Based Quadcopter", *Journal of Physics: Conference Series*, pp. 1–7. doi: 10.1088/1742-6596/1413/1/012003.
7. D. S. V. Kumar, A. Beckers *et al.* (2019). "An In-depth and Black-Box Characterization of the Effects of Laser Pulses on ATmega328P", *International Conference on Smart Card Research and Advanced Applications*, pp. 156–170. doi: 10.1007/978-3-030-15462-2_11.
8. Borak, T., Kushnir D., Paramud Y. *et al.* (2022). "Microprocessor Subsystem of the Smart House to Control the Multichannel Irrigation of the Room Plants", *Advances in Cyber-Physical Systems*, 7(1), pp. 1–7. doi: 10.23939/acps2022.01.001.
9. Arduino Joystick Library (2022). [Electronic resource]. – Access mode: <https://github.com/MHeironimus/ArduinoJoystickLibrary>. (Accessed: May 22 2022).

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-03>

Баранчук Сергій Анатолійович, студент

Бортник Катерина Яківна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0001-5282-099x>

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ТОРГІВЛІ НА КРИПТОВАЛЮТНИХ БІРЖАХ НА ОСНОВІ NODE.JS ТА БІБЛІОТЕКИ REACT

Баранчук С.А., Бортник К.Я. Автоматизована система торгівлі на криптовалютних біржах на основі **Node.js** та бібліотеки **React**. Розроблено повноцінний Fullstack веб-додаток (веб-систему) для взаємодії з криптовалютним ринком. Були розроблені необхідні скрипти для отримання, обробки та зберігання даних, зручний інтерфейс та систему авторизації користувачів. Дана система дозволяє в автоматизованому режимі знаходити можливості для заробітку під час торгівлі на криптовалютних біржах.

Ключові слова: криптовалюта, блокчейн, веб-технології, JavaScript, React, Node.js, стек MERN.

Baranchuk S., Bortnyk K. Automated trading system on cryptocurrency exchanges based on **Node.js** and **React** library. A full-stack web application (SaaS system) for interacting with the cryptocurrency market was developed. Necessary scripts for data retrieval, processing, and storage, convenient user interface, and user authorization system were developed. This system allows for automated identification of earning opportunities during cryptocurrency trading.

Keywords: cryptocurrency, blockchain, web technologies, JavaScript, React, Node.js, MERN stack.

Постановка наукової проблеми. Однією з найбільш динамічно зростаючих галузей останніх років є криптовалютна галузь, яка наразі налічує понад 9 тис. криптовалют та більше 400 крипто-бірж. Високе різноманіття та конкуренція на ринку вимагають розробки відповідних інструментів, що стануть у нагоді трейдерам, а конкретніше – автоматизованих систем, що будуть аналізувати криптовалютні ринки. Ці системи повинні враховувати різні типи даних, такі як дані про курси, статистичні дані про ринок, дані про замовлення на купівлю та продаж криптовалют, в залежності від обсягу торгів на конкретній біржі та вимог до системи торгівлі. Функціональний опис автоматизованої системи для торгівлі повинен включати аналіз даних для прийняття рішень про покупку чи продаж криптовалют та моніторинг ринку для виявлення нових можливостей для торгівлі. Важливо також визначити, як буде відбуватися взаємодія з біржами та як будуть оброблятися отримані з них дані. Створення автоматизованої системи торгівлі на криптовалютних біржах є доцільним з точки зору автоматизації процесу торгівлі та збільшення ефективності прийняття рішень. Використання високопродуктивних, сучасних веб-технологій та підходів, таких як Node.js та React, може допомогти забезпечити швидке та надійне функціонування систем.

Аналіз досліджень. Основна стратегія торгівлі, на яку спрямована розроблювана система – це арбітраж. Криптовалютним арбітражем називають перепродаж криптовалют з метою отримання прибутку за рахунок різниці в ціні на різних ринках (біржах). Арбітражист виявляє можливості купівлі активів на одній біржі за нижчою ціною, з метою подальшого продажу їх на іншій біржі за вищою ціною, отримуючи прибуток в результаті.

Криптобіржі бувають двох типів: централізовані (CEX) та децентралізовані (DEX). Централізована криптобіржа (CEX) – це підхід, коли кошти користувачів зберігаються безпосередньо на платформі, а процес обміну контролюється системою. Зазвичай такі біржі вимагають верифікацію особистості, щоб користувачі могли отримати доступ до усіх функцій та можливостей. Децентралізована криптобіржа (DEX), навпаки, не зберігає кошти користувачів і не контролює процес обміну. Все відбувається через пряму через блокчейн і без посередників, а користувачі самостійно керують власними активами.

Цікаво відзначити, що часто централізовані біржі автоматично виявляють можливості арбітражу на своїх власних ринках і самі займаються внутрішнім криптовалютним арбітражем. Тому, при розробці торгової системи, основним пріоритетом буде орієнтація на міжбіржевий арбітраж.

У відмінну від централізованих бірж, децентралізовані біржі майже не займаються самостійним арбітражем, тому варто окремо розглянути цей ринок. Як вже зазначено вище, процес торгів на DEX-біржах відбувається за допомогою звичайних блокчейн-транзакцій.

Блокчейн (рис. 1) є фундаментом криптовалютної індустрії, технологія якого полягає у розподіленій базі даних, що зберігається на багатьох комп'ютерах та містить записи про транзакції. Кожен блок у ланцюжку містить хеш попереднього блока, що забезпечує безпеку та надійність

системи. Коли нові транзакції виникають, вони збираються в блок, який містить хеш-функцію попереднього блока, що створює зв'язок між блоками у формі ланцюжка. Хеш-функція - це математична функція, яка перетворює вхідні дані в однозначний вихідний код фіксованої довжини, який унікально ідентифікує блок. Це забезпечує інтегритет даних та дозволяє виявляти будь-які зміни в блоках, так як будь-яка зміна в транзакції або блоку призведе до зміни його хеш-коду.

Після того як блок доданий до ланцюжка, він стає незмінним, що робить блокчейн надійним та стійким до фальсифікації даних. Кожен блок містить інформацію про транзакції, такі як дата, час, сума та відправник/одержувач, а також підтвердження криптографічного підпису, що забезпечує автентифікацію та безпеку транзакцій.

Одна з важливих особливостей блокчейн - розподіленість. База даних розподілена на багато комп'ютерів (вузлів), які співпрацюють між собою і підтверджують достовірність транзакцій. Це робить блокчейн відкритим, прозорим та має потенціал виключити посередників, такі як банки, забезпечуючи безпосередні транзакції між сторонами. Кожен вузол має копію повної бази даних блокчейну, і зміни в базі даних можуть бути внесені тільки після згоди більшості вузлів, що забезпечує консенсус в мережі.

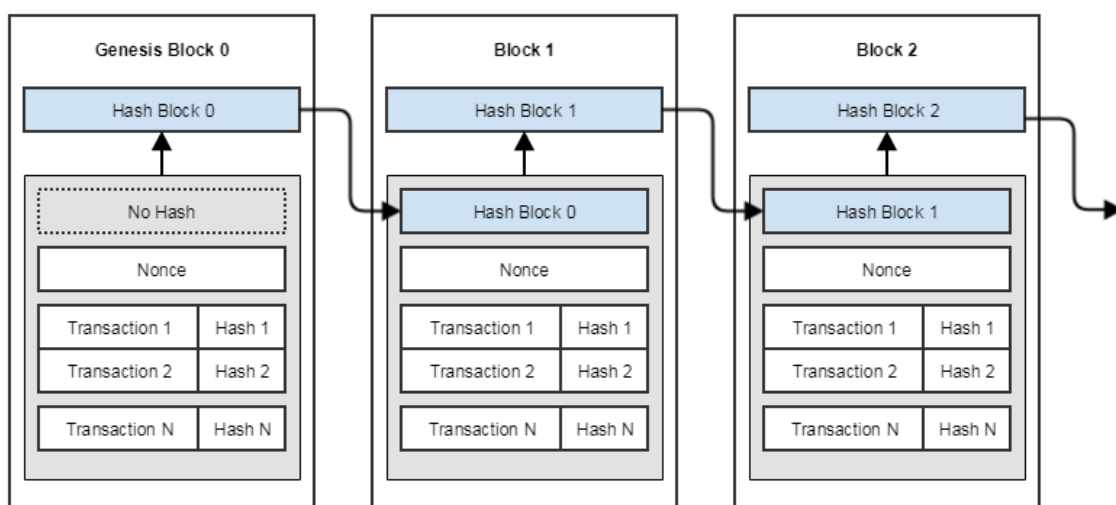


Рис. 1 – Загальна схема архітектури блокчейну

Блокчейн також може мати різні типи консенсусу, такі як "доказ роботи" (proof-of-work) або "доказ власності" (proof-of-stake), які використовуються для підтвердження транзакцій та додавання нових блоків до ланцюжка. Деякі блокчейн мережі також підтримують "розумні контракти" (smart contracts), які є самовиконуваними програмами, що автоматизують виконання умов та угод між сторонами без необхідності посередників.

Використання функціоналу "batching", який дозволяє комбінувати кілька транзакцій в один блок для подальшої обробки, може забезпечити ефективність операцій. Наприклад, під час криптовалютного арбітражу користувач може об'єднати свої операції до одного блоку та відправити його в блокчейн, зменшуючи загальну комісію, оскільки комісія сплачується лише за сам блок, а не за кожну окрему операцію.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Для розробки програмного забезпечення була вибрана мова програмування JavaScript з такої причини, що вона є однією з найпопулярніших мов для веб-розробки, має велику кількість бібліотек та фреймворків, що значно полегшує розробку програмного забезпечення. На основі JavaScript побудований стек технологій MERN (MongoDB, Express.js, React.js, Node.js), який дозволяє розробляти сучасні Fullstack веб-додатки та системи:

- MongoDB - це документо-орієнтована система управління базами даних, яка забезпечує зручний доступ до даних та можливість простого масштабування.

- Express.js - це веб-фреймворк на основі Node.js для розробки серверних додатків на мові JavaScript. Він дозволяє швидко та просто створювати веб-додатки з різноманітними функціями, такими як маршрутизація, обробка запитів та відповідей, робота з параметрами, обробка помилок і багато іншого.

- React.js - це бібліотека JavaScript для розробки користувацьких інтерфейсів (UI) веб-додатків. Вона дозволяє розробникам створювати ефективні та інтерактивні інтерфейси з використанням компонентної архітектури.

- Node.js - це середовище виконання JavaScript на серверному боці, яке базується на двигуні V8 JavaScript від Google. Воно дозволяє виконувати код JavaScript на серверному боці та забезпечує подієвий та неблокуючий ввід/вивід, що робить його ефективним для розробки масштабованих та високопродуктивних серверних додатків. Node.js також має багатий набір модулів, які дозволяють розширювати його функціональність для різних застосувань, таких як розробка веб-серверів, API, мережних додатків, роботи з базами даних та багато іншого.

Для взаємодії з криптовалютними біржами, система буде використовувати REST API - архітектурний стиль для побудови веб-сервісів, що базується на протоколах HTTP і URL. REST API дозволяє взаємодіяти між клієнтом та сервером за допомогою HTTP-запитів, таких як GET, POST, PUT, DELETE та інші. Кожен ресурс у REST API представлений у вигляді URI-адреси, за якою можна звернутися для отримання або зміни його стану. Такий підхід дозволяє користувачам отримувати необхідні дані безпосередньо через URL-адресу веб-сайту. Приклад такого запиту зображений на рисунку 2. В коді системи кожна криптобіржа представлена у вигляді окремого класу, а отримані дані обробляються функціями-конструкторами та приводяться до єдиного вигляду, для подальшої обробки.

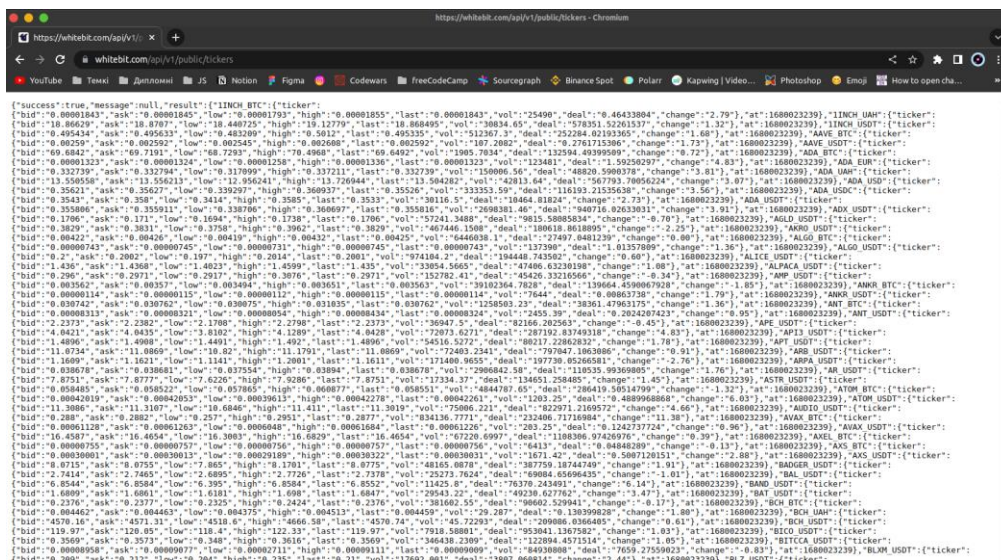


Рис. 2 – HTTP запит до криптобіржі на отримання цін

База даних MongoDB, яка використовується системою, містить таблицю "users", де зберігаються дані про користувачів системи. У цій таблиці є наступні поля:

- id (тип: ObjectId): унікальний ідентифікатор користувача, який автоматично генерується системою.
- fullName (тип: String): повне ім'я користувача.
- login (тип: String): логін користувача, який використовується для входу в систему.
- passwordHash (тип: String): хеш пароля користувача.
- userPhoto (тип: String): файл base64 з зображенням користувача.
- role (тип: String): роль користувача в системі.

Mongoose (JavaScript-фреймворк для взаємодії з MongoDB) автоматично додає поле "id" до всіх моделей даних. Наразі, база даних використовується лише для авторизації користувачів, але завдяки можливостям MongoDB, модель користувача може бути легко розширена, наприклад, для зберігання даних про транзакції, доходи користувача та інші. Основна архітектура створеної системи містить 3 шари:

- шар представлення даних на клієнтській стороні;
- сервер додатку;
- шар, що керує ресурсами у базі даних.

Ця архітектура може бути розширена до багатошарової, додавши додаткові сервери або інші об'єкти взаємодії. На рисунку 3 зображена трьохшарова архітектура веб-додатку з додатковим шаром, в який входять зовнішні джерела, з якими він взаємодіє.

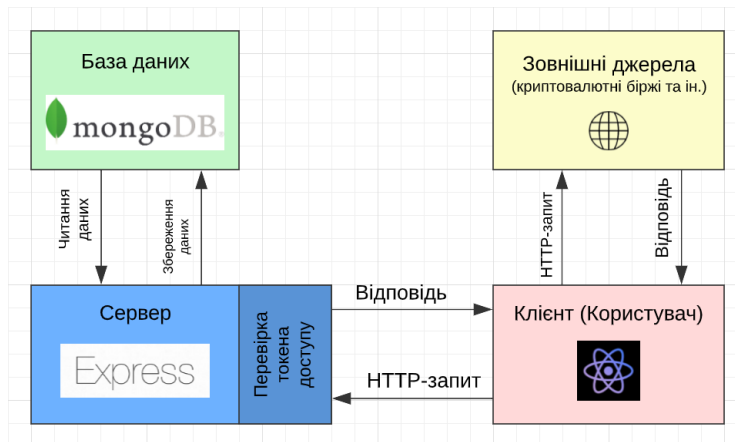


Рис. 3 – Архітектура розробленої системи

Для створення компонентів у React використовується JSX - розширення синтаксису JavaScript, яке дозволяє використовувати HTML-подібні теги в JavaScript коді для створення користувацького інтерфейсу. Це дає розробникам можливість використовувати знайомий синтаксис HTML для створення елементів інтерфейсу, які можуть містити вбудований JavaScript код для динамічних функцій та обробки подій. JSX є частиною бібліотеки React. Код JSX компілюється в стандартний JavaScript, який виконується в браузері або на сервері.

Усі компоненти розробленої системи мають дуже схожу структуру. Для прикладу, код головного компонента App, що відповідає за відображення розробленого React-проекту, показаний на рисунку 4.

```
13 function App() {
14   const dispatch = useDispatch()
15   const isAuthenticated = useSelector(selectIsAuth)
16
17   React.useEffect(() => {
18     dispatch(fetchAuthMe())
19   }, [])
20
21   if (!isAuthenticated) {
22     return (
23       <div className="app">
24         <Routes>
25           <Route path="/" element={<HomePage/>} />
26           <Route path="/login" element={<Login/>} />
27         </Routes>
28       </div>
29     )
30   }
31
32   return (
33     <div className="app">
34       <Routes>
35         <Route path="/" element={<HomePage/>} />
36         <Route path="/login" element={<Login/>} />
37         <Route path="/profile" element={<Profile/>} />
38         <Route path="/adminpanel" element={<AdminPanel/>} />
39         <Route path="/settings" element={<Settings/>} />
40         <Route path="/cexArbitrage" element={<CEXArbitrage/>} />
41         <Route path="/crossExArbitrage" element={<CrossExArbitragePage/>} />
42       </Routes>
43     </div>
44   )
45 }
46
47 export default App;
```

Рис. 4 – Код базового компоненту системи

Спочатку, в компоненті App встановлюється зв'язок між компонентом і Redux store за допомогою хука useSelector. Змінна isAuthenticated містить значення true, якщо користувач автентифікувався, і false в іншому випадку. В компоненті App також використовується хук useEffect з порожнім масивом залежностей, оскільки ми хочемо відправити запит на сервер лише один раз, при завантаженні компонента. Це досягається за допомогою функції dispatch, яка відправляє дію

fetchAuthMe до Redux store. Ця дія запитує інформацію про автентифікацію користувача на сервері. Якщо значення isAuth дорівнює false, то компонент повертає JSX код з двома маршрутами: / і /login. Якщо значення isAuth дорівнює true, то компонент повертає JSX код з декількома маршрутами: /, /login, /profile, /adminpanel, /settings, /сехArbitrage та /crossExArbitrage.

У цьому коді також використовується компонент Routes з бібліотеки react-router-dom, який дозволяє відображати різний вміст на основі шляху URL. Компонент Route визначає маршрути, пов'язані з певним вмістом, який відображається на сторінці.

Розроблена система має сторінку авторизації користувача (рис. 5), особистий кабінет (рис. 6), та безпосередньо, меню з пошуком можливостей для торгівлі (рис. 7, рис. 8).

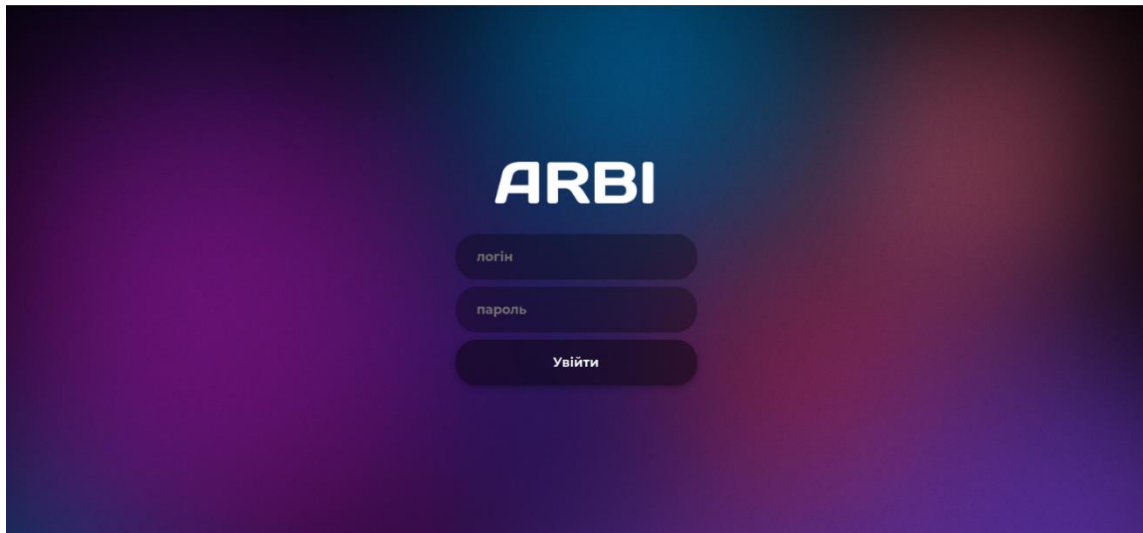


Рис. 5 – Сторінка авторизації користувача

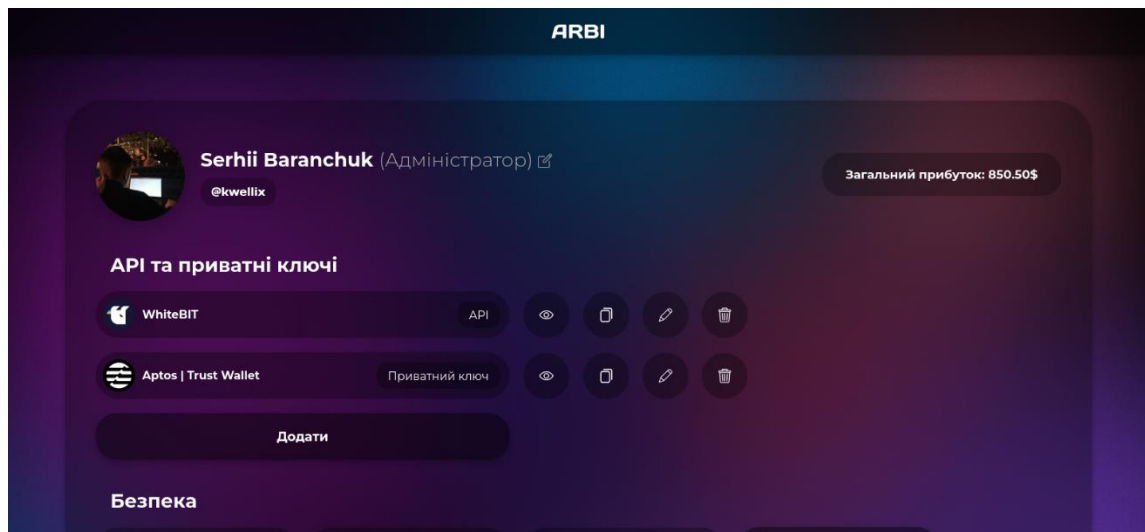


Рис. 6 – Особистий кабінет користувача

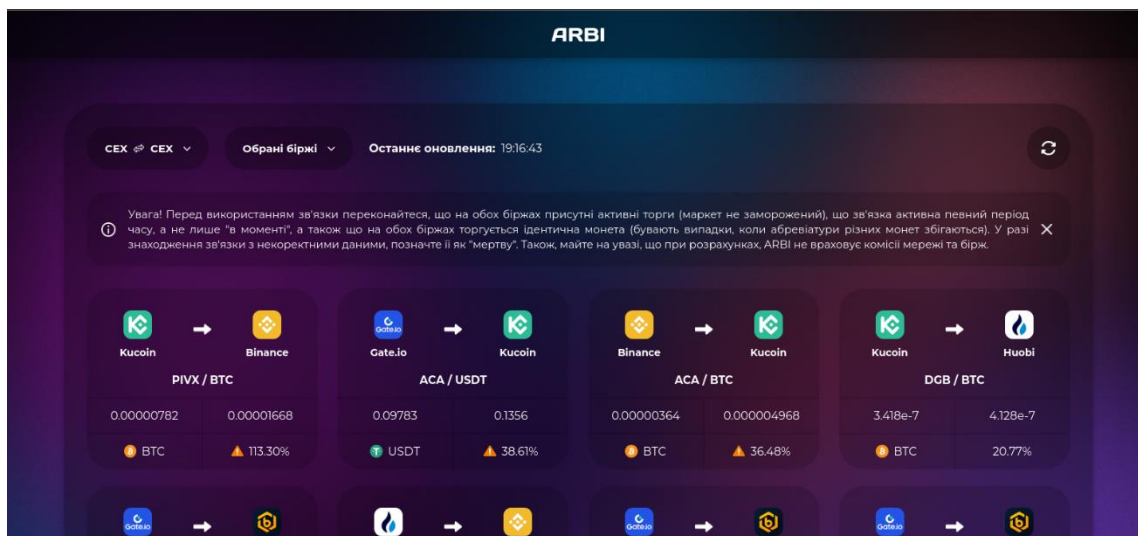


Рис. 7 – Таблиця знайдених для торгівлі можливостей

На рисунку 1.8 видно, щоб під час роботи з системою, була знайдена арбітражна зв'язка для валютної пари MDX/BTC. В даному випадку, трейдер купляє за наявні в нього біткоїни валюту MDX на одній біржі по ціні 0.00000252 BTC, і продає її на іншій біржі по ціні 0.00000299 BTC, тобто з різницею в +18.65%. Для детальнішого аналізу об'ємів потенційної покупки, необхідно дослідити книги замовлень на кожній з двох бірж. Переказ коштів між біржами відбувається за допомогою блокчейну, шляхом виведення коштів з першої біржі, на адресу гаманця користувача на другій біржі.



Рис. 8 – Детальний опис знайденої торгової можливості

Висновки та перспективи подальшого дослідження. У даній роботі було спроектовано та розроблено систему для автоматизації процесу торгівлі на криптовалютних біржах. Вона дозволяє в автоматичному режимі знаходити можливості для заробітку на криптовалютному ринку. Система розроблялася з використанням останніх сучасних веб-технологій, а тому має дуже хороші можливості для розширення функціоналу, масштабування та модернізації. Був забезпечений зв'язок з базою даних, процес авторизації користувачів, налагоджено процес отримання даних з зовнішніх джерел, для їх подальшої обробки та відображення результатів. Дана система може використовуватися трейдерами різного рівня з метою заробітку, а також легко бути перетворена в SaaS (програмне забезпечення як послуга) сервіс, та надаватися в користування на платній основі.

Список бібліографічного опису

1. Поченчук Г.М. Фінансові технології: розвиток і регулювання. Економіка і суспільство. 2017. №13. С. 1193—1200.
2. Балазюк О. Ю., Пилявець В. М. Технологія блокчейн: дослідження суті та аналіз сфер використання. Економіка та суспільство. 2022. № 43. С. 8.

3. Жеребцов О.А, Іжиков А.Ю Використання функціонального програмування у JavaScript та фреймворках. Інноваційні рішення в інженерії програмного забезпечення. 2022. №9. С. 162—169.
4. Крашівський А.І. Розробка веб-системи з використанням Node.js та MongoDB наприкладі системи автоматизації HR-процесів. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. 2022 р. с. 3
5. Міковські Майкл, Пауелл Джош. Розробка односторінкових веб-додатків. ДМК Пресс, 2014. 512 с.
6. Lambert M. Surhone, Mariam T. Tennoe, and Susan F. Henssonow. 2010. Node.js. Betascript Publishing, Beau Bassin, MUS.

References

1. Pochenchuk H.M. Financial technologies: development and regulation. Economy and society. 2017. No. 13. P. 1193—1200.
2. Balazyuk O. Yu., Pyliavets V. M. Blockchain technology: a study of the essence and analysis of areas of use. Economy and society. 2022. No. 43. P. 8.
3. O. A. Zherebtsov, A. Izhikov. Use of functional programming in JavaScript and frameworks. Innovative solutions in software engineering. 2022. No. 9. P. 162—169.
4. Krashivskyi A.I. Development of a web system using Node.js and MongoDB, for example, an HR process automation system. Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu. 2022. p. 3
5. Mikowski Michael, Powell Josh. Development of single-page web applications. DMK Press, 2014. 512 p.
6. Lambert M. Surhone, Mariam T. Tennoe, and Susan F. Henssonow. 2010. Node.js. Betascript Publishing, Beau Bassin, MUS.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-04>

УДК 004.94:656.02

Багнюк Наталія Володимирівна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-7120-5455>

Бортник Катерина Яківна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0001-5282-099X>

Лавренчук Світлана Василівна

<https://orcid.org/0000-0002-5453-3924>

Домарацький Ілля Віталійович, магістр

Луцький національний технічний університет, м.Луцьк, Україна

ПРИНЦИП РОБОТИ КРОСПЛАТФОРМЕННИХ ДОДАТКІВ З ВЕЛИКИМИ ОБ'ЄМАМИ ДАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ БІБЛІОТЕКИ REDUX

Багнюк Н.В., Бортник К.Я., Лавренчук С.В., Домарацький І.В. Принцип роботи кросплатформених додатків з великими об'ємами даних з використанням бібліотеки Redux. У статті було розглянуто проблеми розробки кросплатформених додатків з великими обсягами даних та запропоновано способи їх вирішення. Досліджено принцип роботи кросплатформених додатків з великими об'ємами даних з використанням бібліотеки Redux та порівняно його з Redux toolkit.

Ключові слова: React Native, Redux, кросплатформенні додатки, Redux toolkit.

Bahniuk N., Bortnyk K., Lavrenchuk S., Domaratskyi I. The principle of operation of cross-platform applications with large volumes of data using the Redux library. This article considered the problems of developing cross-platform applications with large amounts of data and suggested ways to solve them. The principle of operation of cross-platform applications with large amounts of data using the Redux library was studied and compared with the Redux toolkit.

Keywords: React Native, Redux, cross-platform applications, Redux toolkit.

Постановка проблеми та аналіз досліджень. Постійний ріст обсягів даних, що генеруються та оброблюються в сучасному програмному забезпеченні, ставить перед розробниками складні завдання щодо оптимізації та ефективного управління цими даними. Одним із найважливіших аспектів є підтримка різних платформ, оскільки користувачі використовують різні пристрої з різними операційними системами. Крім того, необхідно забезпечити швидкий та ефективний доступ до великих обсягів даних без зайвого навантаження на пристрої користувача. Проведено дослідження щодо використання бібліотеки Redux для керування станом додатка та оптимізації роботи з великими обсягами даних, але до цього часу не проведено аналізу та порівняння різних підходів до роботи з даними в кросплатформених додатках. Отже, в статті розглядається аналіз досліджень та досвіду використання Redux для роботи з великими обсягами даних в кросплатформених додатках з метою з'ясування переваг та недоліків цього підходу та визначення оптимальних практик для розробки ефективних додатків з великими обсягами даних.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Хоча кросплатформенність додатків і може розв'язати деякі проблеми з їх сумісністю на різних платформах, збільшення обсягу даних, що обробляються, може призвести до проблем з продуктивністю та взаємодією з користувачем. Використання бібліотеки Redux може допомогти зберегти ефективність додатків з великими об'ємами даних, однак дослідження в цій області все ще не вирішують всіх питань, пов'язаних з оптимізацією продуктивності та взаємодією з користувачем в кросплатформених додатках з великими об'ємами даних. Тому дослідження зосереджені на вивченні цих частин загальної проблеми та пошуку способів їх вирішення [4].

Метою даного дослідження є вивчення принципу роботи кросплатформених додатків з великими об'ємами даних з використанням бібліотеки Redux. Крім того, метою є дослідження різних підходів до розробки кросплатформених додатків з використанням Redux, що дозволить знайти оптимальний підхід до реалізації таких додатків з великими об'ємами даних.

Результати дослідження можуть бути корисними для розробників кросплатформених додатків та інших зацікавлених осіб у галузі розробки програмного забезпечення.

Виклад основного матеріалу дослідження

Розглянуто принцип роботи кросплатформених додатків з великими об'ємами даних з використанням бібліотеки Redux. Бібліотека Redux використовується для керування станом додатку, що дозволяє зменшити кількість коду та зробити додаток більш простим для розуміння

та розширення [2].

Кросплатформність (або багатоплатформність, мультиплатформність) – властивість програмного забезпечення працювати більш ніж на одній програмній (в тому числі операційній системі) або апаратній платформі, та технології, що дозволяють досягти цієї властивості.

Кросплатформність дозволяє суттєво скоротити витрати на розробку нового або адаптацію існуючого програмного забезпечення. Залежно від засобів реалізації, кросплатформність поділяється на

- кросплатформність на рівні мов програмування (а також інструментів таких мов: компіляторів та редакторів зв'язків);
- кросплатформність на рівні середовища виконання;
- кросплатформність на рівні операційної системи;
- кросплатформність на рівні апаратної платформи.

Кросплатформенні додатки стали дуже популярними за останні роки, оскільки дозволяють розробляти додатки, що можуть працювати на різних операційних системах. Однак, великі об'єми даних можуть стати проблемою для кросплатформенних додатків, оскільки вони можуть призвести до зниження продуктивності та затримок у роботі додатку. У даному дослідженні проаналізовані проблеми, що виникають при роботі з великими об'ємами даних в кросплатформенних додатках та запропоновані методи використання бібліотеки Redux для їх вирішення (рис. 1).

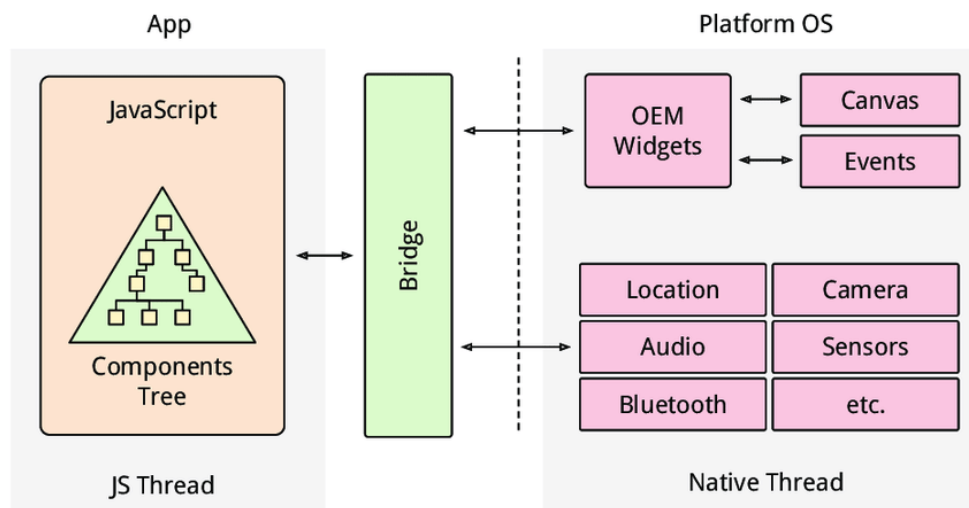


Рис. 1. – Архітектура кросплатформенного додатку React Native

Крім того, подальші дослідження зосереджені на дослідженні підходів для оптимізації роботи додатків з великими об'ємами даних, таких як використання пагінації, ліниве завантаження та кешування даних. Також розглядаються можливості використання інших бібліотек та фреймворків, які можуть допомогти вирішити проблему великих об'ємів даних. Дослідження також включає порівняння різних підходів до роботи з великими об'ємами даних у кросплатформенних додатках, щоб визначити найбільш оптимальний та ефективний підхід для вирішення даної проблеми [1].

Redux є бібліотекою управління станом додатку, яка забезпечує просту та прозору роботу зі станом застосунку. Вона базується на парадигмі функціонального програмування та є відкритим джерелом. Redux дозволяє відокремити стан застосунку від користувацького інтерфейсу, зберігаючи його в одному місці.

Для роботи з Redux необхідно дотримуватись певної структури додатку та використовувати певні методи, такі як «actions» та «reducers», для зміни стану. Також важливо використовувати інші бібліотеки, такі як «react-redux» та «redux-thunk», для інтеграції з фронтенд-фреймворками та забезпечення асинхронного потоку даних.

Redux toolkit – це набір інструментів для розробки Redux додатків з метою спрощення розробки та зменшення кількості написаного коду. Хоча Redux є потужним інструментом для керування станом додатків, він може бути складним для вивчення та використання, особливо для

новачків. Redux toolkit намагається усунути цю проблему, забезпечуючи набір готових шаблонів та вбудованої логіки для роботи з Redux.

Розробка додатку на Redux без використання Redux toolkit може бути досить складною та вимагати багато часу. Необхідно вручну створювати дії, редуктори та створювати зв'язки між ними. З іншого боку, Redux toolkit має багато готових функцій, таких як `createSlice`, яка дозволяє автоматично створювати дії та редуктори для конкретного сегмента стану додатку. Це значно зменшує кількість написаного коду та спрощує розробку [3].

Однак, якщо розробник має досвід у роботі з Redux та знає, як правильно налаштувати додаток, то він може отримати більшу гнучкість та контроль над процесом розробки за рахунок безпосереднього використання Redux. Вибір між Redux та Redux toolkit залежить від досвіду та вимог розробника та конкретних вимог проекту.

При створенні кроссплатформенного додатку з великими об'ємами даних, використання Redux може значно полегшити розробку та підтримку такого додатку на різних платформах. Зокрема, Redux дозволяє забезпечити єдиний стан додатку на всіх платформах та дозволяє легко зберігати, змінювати та передавати великі об'єми даних між компонентами додатку [5].

Однак, використання Redux може мати свої недоліки, зокрема, велику кількість коду та складність відлагодження. Крім того, великі об'єми даних можуть призводити до зниження продуктивності та збільшення часу відгуку додатку. Тому важливо розглянути й інші підходи до управління станом, такі як контекст React або MobX.

Додаток зберігає всі дані в об'єктах стану, що є невід'ємною частиною бібліотеки Redux. Це дозволяє ефективно керувати даними та забезпечує зручну можливість їх відстеження та маніпулювання. Також Redux пропонує зручний інтерфейс для зміни стану додатку, що забезпечує більшу безпеку та надійність роботи програмного забезпечення.

Крім того, Redux забезпечує можливість розширення функціоналу додатку шляхом додавання нових модулів та зберігання стану у відповідних редюсерах. Це дозволяє розробникам зосередитися на окремих аспектах додатку та забезпечує зручну можливість масштабування та розвитку проекту.

Окрім того, Redux дозволяє забезпечувати більшу безпеку даних та зменшити ризик помилок при роботі з ними, що особливо важливо для додатків з великими об'ємами даних. Це досягається завдяки використанню незмінюваних об'єктів стану, що дозволяє уникнути неочікуваних змін даних та забезпечити їх консистентність (рис. 2).

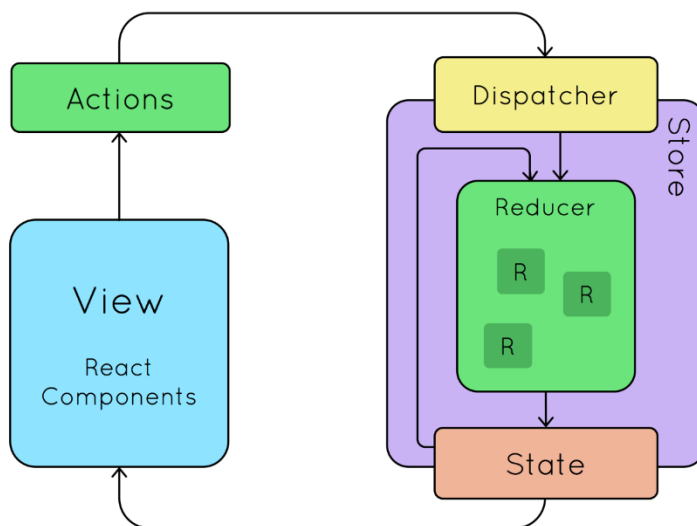


Рис. 2. – Структура Redux фреймворка

Таким чином, використання бібліотеки Redux у кроссплатформенних додатках з великими об'ємами даних є важливим кроком у забезпеченні ефективної та безпечної роботи програмного забезпечення. Описані вище переваги та можливості бібліотеки дозволяють забезпечити необхідну масштабованість, надійність та зручність управління даними в додатках з великими об'ємами даних. Крім того, бібліотека Redux забезпечує зручний інтерфейс для роботи зі станом додатку, що спрощує розробку і підтримку коду. Це дає можливість розробникам ефективно

працювати з великими об'ємами даних без збоїв у роботі програми [8].

Кросплатформенні додатки з використанням Redux можуть бути запущені на різних платформах, таких як веб, мобільні пристрої та настільні комп'ютери. Це забезпечує широку аудиторію користувачів та розвиток бізнесу.

Однак, при дослідженні також виявлено, що при роботі з великими об'ємами даних, може виникати проблема зі швидкістю роботи додатку. Ця проблема може бути вирішена за допомогою оптимізації коду та використання спеціальних бібліотек для роботи з великими об'ємами даних. Крім того, бібліотека Redux дозволяє використовувати механізм middleware для здійснення додаткової обробки даних перед їх збереженням у store. Це дає можливість розширювати функціональність додатка та дозволяє використовувати додаткові бібліотеки та інструменти для обробки даних.

Загальна концепція Redux дозволяє ефективно працювати з великими об'ємами даних та забезпечує їх надійне збереження та маніпулювання. Використання цієї бібліотеки у кросплатформенних додатках дозволяє створювати високоефективні програми, які забезпечують швидку та стабільну роботу незалежно від операційної системи, на якій вони запущені [6].

Одним з основних плюсів використання Redux є можливість декомпозиції додатку на незалежні компоненти та взаємодії між ними шляхом передачі стану через store. Це дозволяє зберігати та керувати станом додатку в одному місці, зробити його більш прогнозованим та контрольованим.

Також Redux має вбудовану підтримку асинхронних дій та можливість використання middleware для обробки дій, що збільшує гнучкість та розширюваність додатку.

Важливим аспектом є також можливість тестування коду, що використовує Redux, завдяки його простоті та однорідності. Тестування допомагає забезпечити якість додатку та виявити можливі помилки в ранній стадії розробки.

Загалом, використання бібліотеки Redux дозволяє зменшити складність додатку, зберігати та управляти станом додатку в одному місці, забезпечити більш прогнозований та контрольований код, підвищити його гнучкість та розширюваність та забезпечити якість за допомогою тестування (рис. 3).

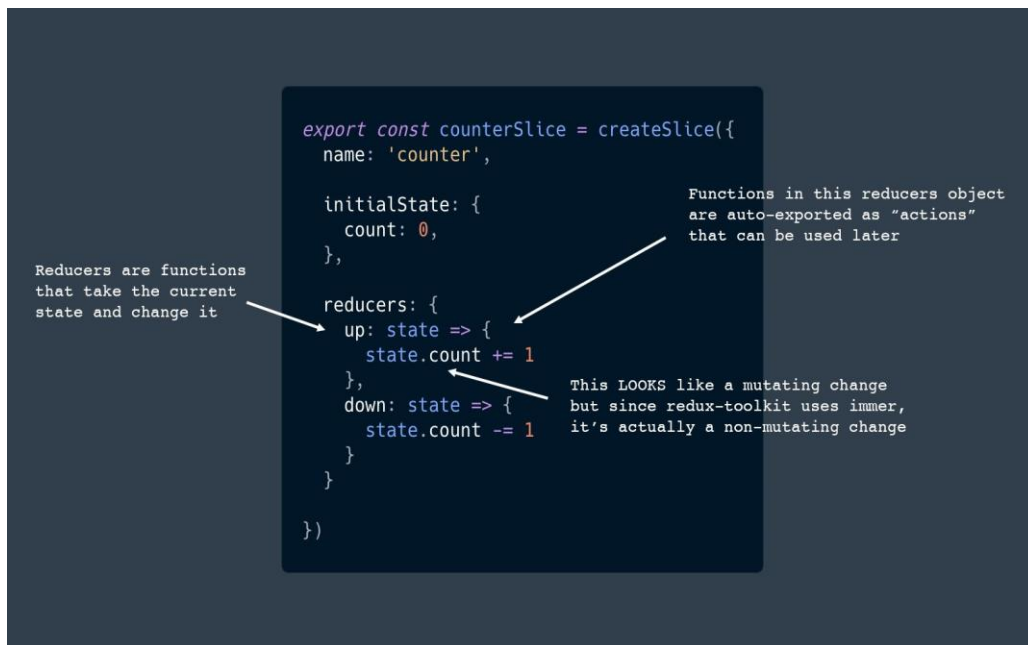


Рис. 3 – Структура Redux slice

Для кращого розуміння принципу роботи кросплатформенних додатків з використанням бібліотеки Redux, розглянемо приклад. Нехай розробляється додаток для онлайн-магазину з великою кількістю продуктів та складів. За допомогою бібліотеки Redux можна зберігати всю інформацію про продукти та склади в глобальному стані нашого додатку. Щоразу, коли користувач робить запит на сайті, додаток буде завантажувати дані з цього глобального стану

замість того, щоб завантажувати їх з сервера знову та знову. Це значно зменшує навантаження на сервер та забезпечує швидшу роботу додатку [7].

Крім того, якщо користувач змінює якусь інформацію, наприклад, кількість одиниць товару на складі, ця зміна буде зберігатися в глобальному стані та оновлюватиметься на всіх сторінках додатка. Це забезпечує єдину точку доступу до даних та запобігає можливим проблемам синхронізації.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Досліджено принцип роботи кроссплатформених додатків з великими об'ємами даних з використанням бібліотеки Redux та порівняно його з Redux Toolkit. В результаті аналізу можна зробити висновок, що Redux є потужним інструментом для керування станом додатку та дозволяє ефективно працювати з великими об'ємами даних. Однак, Redux Toolkit надає більш простіший та зрозуміліший підхід для розробки додатків з використанням Redux.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення підходів розробки додатків на Redux та на дослідження використання Redux Toolkit в більш складних додатках з великими об'ємами даних. Також можна дослідити використання Redux в поєднанні з іншими бібліотеками та фреймворками, що дозволяє більш гнучко працювати зі станом додатку та збільшує його швидкодію. За результатами дослідження можна стверджувати, що Redux та Redux Toolkit є потужними інструментами для розробки кроссплатформених додатків з великими об'ємами даних та дозволяють значно спростити та прискорити розробку таких додатків.

Список бібліографічного опису

1. Redux. (2022). Отримано з <https://redux.js.org/>
2. Abramov, D. (2015). Початок роботи з Redux. Отримано з <https://egghead.io/courses/getting-started-with-redux>
3. Kang, J., Kim, Y., & Kim, D. (2017). Дослідження впровадження кроссплатформеної мобільної програми з використанням react-native. Журнал Товариства корейського академічного та промислового співробітництва, 18(4), 155-161.
4. Lee, J., & Yoo, C. (2018). Потік даних у реальному часі на основі Redux для веб-додатків із Firebase і React. Журнал Корейського товариства академічної та промислової співпраці, 19(11), 45-53.
5. Gallo, A., Hester, B., & Treude, C. (2020). Вплив Redux на якість коду: емпіричне дослідження додатків React Native. Емпірична інженерія програмного забезпечення, 25(6), 3942-3976.
6. Cheng, P., Yang, L., Liu, X., Chen, Q., & Wang, Z. (2019). Дослідження оптимізації кроссплатформної системи розробки додатків на основі продуктивності. У 2019 році 3-я Міжнародна конференція з комп'ютерних наук та штучного інтелекту (CSAI 2019) (pp. 507-511). Atlantis Press..
7. Li, Y., & Lin, K. (2019). Дослідження оптимізації кроссплатформної розробки додатків на основі React Native. У 2019 році Міжнародна конференція з комп'ютерних наук та програмної інженерії (CSSE) (pp. 109-112). IEEE..
8. Liu, H., Wang, Y., Ma, Z., & Liu, Q. (2020). Дослідження кроссплатформної мобільної розробки на основі Weex. Journal of Physics: Серія конференцій, 1704(1), 012078.

References

1. Redux. (2022). Retrieved from <https://redux.js.org/>.
2. Abramov, D. (2015). Getting Started with Redux. Retrieved from <https://egghead.io/courses/getting-started-with-redux>
3. Kang, J., Kim, Y., & Kim, D. (2017). A study on the implementation of cross-platform mobile application using react-native. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 18(4), 155-161.
4. Lee, J., & Yoo, C. (2018). Redux-based Real-time Data Flow for Web Application with Firebase and React. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 19(11), 45-53.
5. Gallo, A., Hester, B., & Treude, C. (2020). Redux's impact on code quality: an empirical study on React Native applications. Empirical Software Engineering, 25(6), 3942-3976.
6. Cheng, P., Yang, L., Liu, X., Chen, Q., & Wang, Z. (2019). Research on the Optimization of Cross-platform Application Development Framework Based on Performance. In 2019 3rd International Conference on Computer Science and Artificial Intelligence (CSAI 2019) (pp. 507-511). Atlantis Press..
7. Li, Y., & Lin, K. (2019). A Study on the Optimization of Cross-platform App Development Based on React Native. In 2019 International Conference on Computer Science and Software Engineering (CSSE) (pp. 109-112). IEEE..
8. Liu, H., Wang, Y., Ma, Z., & Liu, Q. (2020). Research on Cross-platform Mobile Development Based on Weex. Journal of Physics: Conference Series, 1704(1), 012078.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-05>

УДК: 37:004.9(045)

Гулівата Інна Олександрівна, к.пед.н., доцент

<http://orcid.org/0000-0003-4752-535X>

Ніколіна Ірина Іванівна, канд. наук держ. упр., доцент

<http://orcid.org/0000-0001-7718-8599>

Вінницький торговельно-економічний інститут Державного торговельно-економічного університету, м. Вінниця, Україна

ЦИФРОВІ ІНСТРУМЕНТИ У РЕАЛІЗАЦІЇ БЕЗБАР'ЄРНОГО ОСВІТНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Гулівата І.О., Ніколіна І.І. Цифрові інструменти у реалізації безбар'єрного освітнього середовища. Проаналізовано поняття освітньої безбар'єрності. Означено державний підхід щодо реалізації освітньої безбар'єрності спрямований на розвиток інклюзивної системи освіти, дистанційного навчання, набуття новітніх компетенцій, зокрема цифрових. Здійснено огляд сучасних цифрових інструментів та технологій у реалізації безбар'єрного освітнього середовища для осіб з інвалідністю, маломобільних груп та людей особливими освітніми потребами.

Ключові слова: цифрові інструменти, безбар'єрність, освітнє середовище, дистанційне навчання, мультимедіа.

Hulivata I.O., Nikolina I.I. Digital tools for the introduction to a barrier-free educational environment. The article analyzes the concept of a barrier-free education accessibility. It discusses the government approach to the implementation of barrier-free education which is aimed at the development of an inclusive educational system, distance learning, and the acquisition of modern competencies, including digital ones. An article carries out analysis of the newest digital tools and technologies in the implementation of a barrier-free educational environment for persons with disabilities, groups with limited mobility and people with special educational needs.

Keywords: digital tools, accessibility, educational environment, distance learning, multimedia.

Постановка наукової проблеми. В українському суспільстві існує комплекс викликів, пов'язаний із наявністю проблем для різних маломобільних груп населення стосовно можливості повноцінного, безбар'єрного доступу до освіти, зайнятості, отримання адміністративних послуг держави [1].

Аналіз міжнародного досвіду країн Західної Європи та США свідчить про перехід системи спеціальної освіти на якісно новий етап свого розвитку, в основі якого є інтеграція, інклюзія та цифровізація освіти. Це зумовлено насамперед завданнями соціальної та освітньої інтеграції дітей, а тому поява нових інтерактивних інформаційних технологій стає напрямом, що стрімко розвивається. Суть такого роду технологій полягає в тому, щоб за рахунок комп'ютера «компенсувати» існуючий недолік у розвитку дитини цим самим відкрити можливість її інтеграції в суспільство та сприяти доступу до освіти.

Слабка інклюзивність української системи освіти негативно впливає на об'єктивні показники держави, на що вказує індекс соціальної мобільності ВЕФ [1, с. 4]. Додатково, на тлі військової агресії з боку росії, зростає кількість осіб з інвалідністю, маломобільних груп та людей особливими освітніми потребами. З метою подолання наявних перешкод для таких категорій осіб щодо доступності в інфраструктурній, економічній, освітній та соціальній сферах постає необхідність пошуку інноваційних рішень в цифровій площині.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження практик світового досвіду створення безбар'єрного середовища та соціальної інклюзії висвітлені у працях Зубченко С. О., Каплан Ю. Б., Тищенко Ю. А. [1] Питання впровадження цифрових освітніх інструментів розкриваються у працях Близнюк Т.О., Кривонос О.М., Котенко О.Д. Аналіз дистанційних платформ у реалізації освітнього процесу в закладах освіти проведений Корильчук Н.І., Первак М.П., Черновою Т.Ю. Прийоми та методи впровадження мультимедіа у процес навчання запропоновані Заболотним В.Ф. [5], Моклюком М.О., Мислицькою Н.А. Сучасні освітні технології представлення навчального контенту розглянуті у працях Ніколіної І.І. [6], Литвинової С.Г. та інших.

Метою статті є огляд сучасних цифрових інструментів та технологій у реалізації безбар'єрного освітнього середовища для осіб з інвалідністю, маломобільних груп та людей особливими освітніми потребами.

Виклад основного матеріалу дослідження. Державна політика для усунення викликів, пов'язаних із наявністю проблем для різних маломобільних груп населення стосовно можливості повноцінного, безбар'єрного доступу до освіти, зайнятості, отримання адміністративних послуг, втілена в Національній стратегії зі створення безбар'єрного середовища в Україні на період до 2030 року [2]. Де безбар'єрність визначена як загальний підхід до формування та імплементації політики для забезпечення безперешкодного доступу всіх груп населення до різних сфер життєдіяльності, у тому числі освітньої [2].

Візія освітньої безбар'єрності передбачає створення рівних можливостей та вільного доступу до освіти, зокрема освіти протягом життя, а також здобуття іншої професії, підвищення кваліфікації та опанування додаткових компетентностей [2].

Враховуючи міжнародний досвід та сучасні українські реалії, реалізація безбар'єрного освітнього простору у нашій державі лежить у площині впровадження цифрових технологій у формальну та неформальну освіту на різних навчальних майданчиках, що в цілому сприятиме подоланню цифрової безбар'єрності та підвищенню цифрової грамотності населення.

Одним з фундаментальних напрямів інформатизації та комп'ютеризації освіти є використання нових інформаційних технологій з метою впровадження в практику розвивального навчання та підвищення рівня навчання у закладах освіти. Комп'ютерні та інформаційні технології набувають значення не тільки в контексті предмета навчання, а й як досить дієвий результативний засіб корекційного впливу у побудові безбар'єрного освітнього середовища. З цієї причини в сучасних реаліях вже неможливо уявити заняття без активного використання цифрових технологій. Сприятливе поєднання комп'ютерних та традиційних методів визначає важливість ефективності їх використання в корекційній роботі, а також у процесі викладання навчальних дисциплін.

Державний підхід щодо реалізації освітньої безбар'єрності спрямований на розвиток інклюзивної системи освіти, дистанційного навчання, набуття новітніх компетенцій, зокрема цифрових.

З метою реалізації цієї політики та залучення населення до інформаційного суспільства розробляються цифрові продукти, як на рівні уряду, так і організацій та установ, запускаються програми розвитку цифрової грамотності для різних цільових груп.

Так, Міністерством цифрової трансформації розроблено оновлену платформу Дія.Освіта [3], де розміщено сотні безоплатних освітніх серіалів, які допоможуть:

- розвивати технологічну культуру та soft skills;
- підвищити рівень комп'ютерної грамотності;
- підвищити рівень володіння англійською мовою;
- опанувати нову професію в абсолютно різних сферах: графічного дизайнера, проєктного менеджера, пекаря, баристи тощо;
- внутрішню переміщеній особі знайти роботу в іншому регіоні.

Серед закладів освіти набуває широкої популярності використання різних освітніх платформ під час навчання, таких як Prometheus, EdEra, Skillshop та багато інших.

У 2022 році від Міністерства освіти і науки та Google Україна стартувала різнорівнева програма «Цифрові інструменти Google для освіти» для вихователів, вчителів і викладачів [4]. На базовому рівні учасники програми зможуть навчитися працювати з мобільними пристроями; на середньому – з вебпереглядачем Google Chrome; поглиблений рівень дасть можливість опанувати ноутбук Chromebook.

Такі ініціативи обумовлені вимогами часу для успішної реалізації дистанційної освіти, що надає можливість ефективного навчання широкому колу учасників освітнього процесу, а для осіб з інвалідністю - це, мабуть, єдина можливість реалізувати себе, бути успішним у житті на рівні зі здоровими однолітками. Індивідуальний розклад, зручний для себе темп дозволяє повернутися до вивчення складніших питань, повторити необхідні теми, а вже відомі – пропустити. Значну частину навчального матеріалу здобувач освіти може вивчати самостійно, що покращує запам'ятовування та розуміння пройдених тем. Крім того, використання під час навчання сучасних цифрових технологій підвищує його ефективність та робить цікавим. Навчаючись з використанням ПК, особа не відчувається інвалідом, обмеженим просторовими та часовими рамками, у неї з'являється зв'язок буквально з усім світом.

Дистанційне навчання як інноваційна технологія має низку переваг:

- доступ осіб з інвалідністю до освітніх та інших інформаційних ресурсів;
- соціалізація та інтеграція осіб з інвалідністю у суспільство;
- інтерактивність навчання;
- просторова безмежність навчання;
- постійне технологічне вдосконалення;
- якісна освіта осіб з інвалідністю.

У той же час з'являються певні труднощі в ході реалізації дистанційного навчання пов'язані з:

- високими матеріальними витратами на технічне оснащення;
- педагогічною та методичною готовністю викладачів;
- технологічною готовністю учасників освітнього процесу;
- готовністю учасників освітнього процесу до комунікації у мережі.

Сьогодні розвиток глобальних мереж та сучасних цифрових технологій створює принципово нові можливості для освітніх установ з точки зору планування, організації та реалізації освітнього процесу. Перехід до дистанційної форми навчання у поєднанні з новими аудіовізуальними мультимедійними технологіями у навчанні осіб з інвалідністю створює рівні освітні можливості.

Технологію мультимедіа можна охарактеризувати як поєднання тексту, зображень, аудіо, відео, графіки та анімації [5]. Поетапність подачі інформації у поєднанні текстових ефектів зі статичними або динамічними зображеннями, комп'ютерним моделюванням та доповненою реальністю сприяють ефективному засвоєнню знань, творчому розвитку здобувачів освіти. Поєднання мультимедіа та комп'ютерно-орієнтованих засобів навчання створює великі можливості у візуалізації навчального матеріалу для осіб з інвалідністю.

Під час мультимедійного навчання відбувається модифікація навчального простору за рахунок поетапного поєднання текстової інформації та зображень організованих в послідовну структуру – демонстраційну комп'ютерну модель, яка сприяє досягненню розуміння навчального матеріалу за рахунок активізації навчально-пізнавальної діяльності здобувача освіти [6]. Саме застосування стратегії активного навчання у поєднанні з використанням інфографіки/відеоконтенту сприяє кращому розумінню навчального матеріалу.

Переваги мультимедійного викладання та навчання:

- залучення здобувача освіти у більш захоплююче середовище. Вибраний контент може бути мультисенсорним, інтерактивним і динамічним, що дозволяє краще візуалізувати складну теорію;
- використання різноманітних медіа сприяє урізноманітненню та підвищенню ефективності навчального процесу, що призводить до кращого засвоєння знань і глибшого рівня їх розуміння;
- використання візуального контенту (зображень, відео та анімації) сприяє розвитку здатності перетворювати абстрактні поняття у прикладні знання;
- підвищення уваги та мотивації студентів сприяє їх більшому залученню до змісту;
- представлення складних теорій та великих об'ємів інформації з меншими зусиллями та часом, ніж текстові альтернативи;
- використання мультимедіа завдяки поетапному та інтерактивному підходу сприяє кращому запам'ятовуванню навчальної інформації.

Таким чином, мультимедіа виступає важливим інструментом трансформації традиційної парадигми викладання та навчання, зокрема у реалізації безбар'єрного освітнього середовища.

Розглянемо сучасні цифрові інструменти, прийоми та методи, які можна використовувати для підвищення ефективності навчання здобувачів освіти, використовуючи широкий спектр медіа:

- цифрові дошки. Дозволяють додавати елементи мультимедіа до спільної стіни, що сприяє креативному мисленню та створює динамічний навчальний ресурс (Google Jamboard, Padlet [7]);
- електронний блокнот, який чудово підходить для спільної роботи та мозкового штурму над спільними нотатками, наприклад колекцією цифрових документів. Користувачі можуть вставляти зображення, аудіо, відео, документи або гіперпосилання та використовувати текст або цифрове чорнило для приміток навколо них (Microsoft OneNote [8], Google Keep);
- Sway – розглядають як інструмент «цифрового оповідання», найкраще підходить для створення візуально привабливих презентацій, інформаційних бюлетенів або лекцій. Він

призначений для забезпечення інтерактивного досвіду порівняно з традиційним підходом односторонньої лекції (Microsoft Sway [9]);

- імерсивні технології [10] можуть включати доповнену та віртуальну реальність і 360-градусні відеозаписи;
- списки перегляду – добірка коротких кліпів для підготовки до заняття. Для цього можна використати відеоплатформу з відкритим кодом YouTube – дозволяє створювати списки відтворення, керувати та ділитися ними з іншими [11]. Редактор насиченого вмісту на Canvas [12] дозволяє вставляти відео YouTube безпосередньо на сторінку;
- активне навчальне завдання до матеріалу, що вивчається. Прикладом такого завдання може бути опитування для обговорення думок і залучення до роздумів засобами Mentimeter [13], короткий тест Canvas із кількома варіантами відповідей для перевірки розуміння після перегляду відео, Google Форми для створення опитувальників, збору та аналізу інформації у режимі реального часу тощо;
- використання зворотного зв'язку засобами аудіо чи відео – заохочення здобувачів освіти до взаємодії через їхні відгуки засобами мультимедіа. У письмовому відгуку можна рекомендувати студентам записи навчальних матеріалів за допомогою гіперпосилань. Інструмент Turnitin [14] дозволяє залишити голосовий запис, Turnitin Draft Coach забезпечує формальний зворотній зв'язок учасників процесу, Canvas SpeedGrader дає можливість записати медіа коментар засобами аудіо чи відео з використанням мікрофона та/або веб-камери свого пристрою або завантажити аудіо чи відеофайл;
- технології для озвучення тексту з екрану комп'ютера або його представлення шрифтом Брайля, серед яких VoiceOver [15], яка орієнтована на осіб з вадами зору.

Використання цифрових освітніх ресурсів допомагає викладачу значно скоротити час на викладення матеріалу, створювати цікаві навчальні та дидактичні посібники, матеріали для тестування, необхідні для реалізації поставлених корекційно-освітніх завдань, швидко знаходити основні та додаткові навчальні матеріали до конкретної теми.

Ефективне навчальне середовище крім системного та якісного викладу навчального матеріалу має бути забезпечене необхідними елементами управління навчанням: електронні журнали та прозора система звітності, завдяки якій викладач може отримати повну інформацію про активність здобувача у вивченні навчального матеріалу та виконання завдань.

Вирішенню цього завдання сприяє використання систем управління навчанням для забезпечення:

- цифрової комунікації учасників освітнього процесу (Google Клас, Moodle); відеозустрічей (Google Meet, Zoom);
- планування та організації робочого дня (Google Календар);
- збереження та спільного використання навчальної інформації у цифровому вигляді (Google Диск).

Реалізація можливостей сучасних цифрових технологій розширює спектр видів навчальної діяльності, дозволяє вдосконалювати існуючі та створювати нові організаційні форми та методи навчання стосовно проблемно-пошукової та проєктної діяльності здобувачів освіти. Для організації командної роботи використовують наступні інструменти Google: документи, таблиці, презентації, сайти. Вони надають можливість групі осіб спільно працювати з одним документом в режимі реального часу.

Використання мультимедійних технологій у навчанні осіб з інвалідністю дозволяє створити умови для самостійного здобуття знань за рахунок:

- візуалізації навчального матеріалу засобами сучасних інформаційно-комунікаційних технологій;
- реалізації методики проблемного навчання;
- автоматизації моніторингу результатів навчання, що дозволяє здобувачу освіти особисто мати повну та об'єктивну інформацію про хід процесу навчання в режимі реального часу (тобто, його досягнення протягом курсу);
- технічних можливостей комп'ютера як дидактичного засобу навчання, що дозволяє ефективно здійснювати розвивальне навчання;
- розвитку креативності та формування психологічної готовності до самореалізації.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Навчальний матеріал з використанням цифрових освітніх інструментів, зокрема мультимедіа, через свою наочність, барвистість і простоту,

здійснюють позитивний вплив, який досягається підвищенням психоемоційного фону учасників освітнього процесу.

Впровадження цифрових інструментів у реалізації безбар'єрного середовища у закладі освіти спрямоване на максимально можливий розвиток особистості через активізацію уваги, сприйняття, мислення, уяви, пам'яті та пізнавальних процесів, що є пріоритетною метою сучасної освіти.

Такий підхід сприяє підвищенню ефективності навчання та цифрової грамотності, індивідуалізації та диференціації навчання, інтеграції учасників освітнього процесу в інформаційне суспільство. Таким чином сучасні цифрові технології виступають інструментом зміни освітньої парадигми орієнтованої на безбар'єрний індивідуальний розвиток особистості.

Крім цифрових компетенцій, сучасний вчитель має володіти також компетенціями, які відповідають принципам інклюзивної освіти, що вимагає спеціальної підготовки вчителів, адаптації навчальних програм, формування навичок співпраці з допоміжним персоналом, сприяння позитивному ставленню в освітньому середовищі до осіб з інвалідністю тощо.

Перспективи подальших досліджень можуть бути спрямовані у напрямку трансформації освітньої парадигми щодо інклюзивності освіти та методики навчання конкретних дисциплін з використанням сучасних цифрових інструментів з метою створення та реалізації безбар'єрного освітнього простору.

Список бібліографічного опису

1. Зубченко С. О., Каплан Ю. Б., Тищенко Ю. А. Створення безбар'єрного середовища та соціальна інклюзія: світовий досвід для України : аналіт. доп. Київ : НІСД, 2020. 24 с.
2. Законодавча база Верховної Ради України. Про схвалення Національної стратегії із створення безбар'єрного простору в Україні на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 14 квіт. 2021 р. № 366-р. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/366-2021-%D1%80#Text>.
3. Дія. Освіта. URL : <https://osvita.diia.gov.ua/>.
4. Цифрові інструменти Google для освіти: 25 липня розпочинається навчання для вихователів, вчителів і викладачів. URL : <https://mon.gov.ua/ua/news/cifrovi-instrumenti-google-dlya-osviti-25-lipnya-rozpochinayetsya-navchannya-dlya-vihovateliv-vchiteliv-i-vikladachiv>.
5. Заболотний В. Ф. Формування методичної компетентності учителя фізики засобами мультимедіа : [монографія]. Вінниця : Едельвейс і К, 2009. 454 с.
6. Гулівата І. О., Ніколіна І. І. Сучасні освітні технології: особливості представлення навчального контенту вищої та прикладної математики. Фізико-математична освіта. 2019. Вип. 3 (21). - С. 48-52. - URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/fmo_2019_3_9.
7. Padlet. URL: <https://uk.padlet.com/>.
8. Microsoft OneNote. Ваш цифровий блокнот. URL: <https://www.microsoft.com/uk-ua/microsoft-365/onenote/digital-note-taking-app>.
9. Sway. URL: <https://sway.office.com/my>.
10. Immersive technology. URL: <https://staff.sussex.ac.uk/teaching/enhancement/support/tools/immersive>.
11. Create and manage playlists. URL: <https://support.google.com/youtube/answer/57792?hl=en-GB&co=GENIE.Platform%3DAndroid>.
12. Canva. URL: https://www.canva.com/uk_ua/.
13. Discover how you can use Mentimeter. URL: <https://www.mentimeter.com/>.
14. Meaningful insights for writing excellence. URL: <https://help.turnitin.com/feedback-studio/turnitin-website/instructor/quickmarks-and-commenting-tools/recording-voice-comments.htm>.
15. Бачення. Для будь-якої точки зору. URL: <https://www.apple.com/accessibility/vision/>.

References

1. Zubchenko, S.O., Kaplan, Yu. B. & Tyshchenko, Yu. A. (2020) *Stvorennia bezbar'iernoho seredovyshcha ta sotsialna inkluziia: svitovyi dosvid dlia Ukrainy : analit. dop.* Kyiv : NISD [in Ukraine].
2. Zakon Ukrainy [Law of Ukraine].
3. (n.d.). zakon.rada.gov.ua. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/366-2021-%D1%80#Text> [in Ukraine].
4. Sait «Diia. Osvita» [Action. Education website]. osvita.diia.gov.ua. Retrieved from <https://osvita.diia.gov.ua/> [in Ukraine].
5. Sait «Tsyfrovi instrumenty Google dlia osvity: 25 lypnia rozpochynaietsia navchannya dlia vykhovateliv, vchiteliv i vykladachiv» [Google Digital Tools for Education: Training for educators, teachers, and professors begins July 25 website]. mon.gov.ua. Retrieved from <https://mon.gov.ua/ua/news/cifrovi-instrumenti-google-dlya-osviti-25-lipnya-rozpochinayetsya-navchannya-dlya-vihovateliv-vchiteliv-i-vikladachiv> [in Ukraine].
6. Zabolotnyi V. F. (2009). *Formuvannia metodychnoi kompetentnosti uchytelia fizyky zasobamy multimedia [Formation of methodological competence of physics teachers by means of multimedia]*. Vinnytsia : Edelweis i K [in Ukraine].
7. Hulivata, I. O. & Nikolina, I. I. (2019). Suchasni osvitni tekhnolohii: osoblyvosti predstavlennia navchalnoho kontentu vyshchoi ta prykladnoi matematyky [Modern educational technologies: peculiarities of presentation of educational content of higher and applied mathematics]. *Physical and mathematical education - Physical and mathematical education*, 3, 48-52 [in Ukraine].

8. Sait «Padlet» [Padlet website] *padlet.com*. Retrieved from <https://uk.padlet.com/> [in Ukraine].
9. Sait «Microsoft OneNote» [Microsoft OneNote website]. *microsoft.com*. Retrieved from <https://www.microsoft.com/uk-ua/microsoft-365/onenote/digital-note-taking-app> [in Ukraine].
10. Sait «Sway» [Sway website]. *sway.office.com*. Retrieved from <https://sway.office.com/my> [in Ukraine].
11. Sait «Immersive technology» [Immersive technology website]. *staff.sussex.ac.uk*. Retrieved from <https://staff.sussex.ac.uk/teaching/enhancement/support/tools/immersive> [in English].
12. Sait «Create and manage playlists». [Create and manage playlists website]. *support.google.com*. Retrieved from <https://support.google.com/youtube/answer/57792?hl=en-GB&co=GENIE.Platform%3DAndroid> [in English].
13. Sait «Canva». [Canva website]. *canva.com*. Retrieved from https://www.canva.com/uk_ua/ [in Ukraine].
14. Sait «Discover how you can use Mentimeter». [Discover how you can use Mentimeter website]. *mentimeter.com*. Retrieved from <https://www.mentimeter.com/> [in English].
15. Sait «Vision/ For every point of view». [Vision/ For every point of view website]. Retrieved from <https://www.apple.com/accessibility/vision/> [in English].

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-06>

УДК 004.383.3

Кардашук Володимир Сергійович¹, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-7940-6753>

Бортник Катерина Яківна², к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0001-5282-099X>

Багнюк Наталія Володимирівна², к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-7120-5455>

¹ Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Сєверодонецьк, Україна

² Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

МЕТОДИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕСТУВАННЯ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ

Кардашук В.С., Бортник К.Я., Багнюк Н.В. Методи вдосконалення тестування цифрових систем. Розглянуті дослідження в напрямку технології Design & Test, дедуктивно-паралельне моделювання несправності цифрових систем, проведена класифікація існуючих рішень вдосконалення тестування цифрових систем, запропонована узагальнена модель дедуктивно-паралельного аналізу цифрових систем, представлена внутрішня модель та структура даних для аналізу цифрового пристрою, запропонований дедуктивний аналіз дефектів, розглянутий синтез дедуктивної функції за допомогою таблиці істинності.

Ключові слова: SiP, SoC, дефекти, тестування, цифрові системи, синтез, таблиця істинності.

Kardashuk V., Bortnyk K., Bahniuk N. Methods for improving the testing of digital systems. The article examines the latest research of Design & Test technology, deductive parallel modeling of the malfunction of digital systems, classifies existing solutions for improving the testing of digital systems, proposes a generalized model of deductive parallel analysis of digital systems, presents an internal model and data structures for the analysis of a digital device, proposes deductive defect analysis, the synthesis of the deductive function with the help of the truth table.

Keywords: SiP, SoC, defects, testing, digital systems, synthesis, truth table.

Вступ. Домінування цифрових систем на кристалах (SoC – System-on-Chip) та цифрових систем в пакетах (SiP – System-on-Pack) пояснюється тим, що розвиток високих технологій дозволив об'єднати цифрові, аналогові, радіочастотні та навіть компоненти мікроелектромеханічних систем (MEMS – Microelectromechanical systems) в одному пристрої, що зменшує загальний розмір системи та підвищує її продуктивність [1]. На сьогоднішній день створення мініатюрних, спеціалізованих, економічних мобільних та швидкодіючих цифрових виробів є дуже затребуваним у всьому світі. Тестування SoC і SiP необхідне для забезпечення відсутності помилок в продукції через недоліки виробництва. Фактично тестова діяльність відіграє ключову роль у процесі виробництва інтегральних мікросхем завдяки її здатності відрізняти хороші пристрої від несправних перед доставкою кінцевим споживачам, а також для покращення сервісного обслуговування.

В основному тестування складається з двох процесів: генерації тестів і тестового застосування. Виробництво тестів означає процес надання відповідних випробувальних впливів, тоді як тестова програма відноситься до процесу застосування цих тестових впливів до входів схеми та аналізу її реакції. Адаптація існуючих технологій тестування SoC [2], а також розробка нових технологій тестування SiP на сьогоднішній час є пріоритетною проблемою серед вчених та дослідників design-and-test community. Актуальність дослідження полягає в необхідності значного підвищення швидкодії засобів моделювання та генерації тестів для структурно- та функціонально-складних цифрових систем, що імплементуються у кристали програмованої логіки.

Аналіз останніх досліджень. Системи тестування фірм Logic Vision, Synopsys, Mentor Graphics, Candence, їх засоби синтезу тестів та моделювання несправностей неприйнятні за часом обробки цифрових систем на кристалах, в яких налічується декілька мільйонів вентилів. В контексті розгляду цифрових виробів важливо диференціювати типи дефектів за ієрархією: одиночні або кратні несправності - для логічних модулів та пам'яті [3], мікродефекти - для компонентів, що входять до складу SoC або SiP [4]. Щодо систем на кристалах, то реалізація вбудованих тестових методів діагностування передбачає наявність інфраструктури сервісного обслуговування. Стратегія тестування SiP відрізняється від SoC, оскільки система SiP інтегрує компоненти різних виробників. Найперспективнішою стратегією для вбудованого тестування функціональних компонентів є використання стандарту IEEE 1500 [5]. З практичної точки зору протягом тривалого часу для вбудованих інструментів тестування стабільно використовується стандарт IEEE 1149.1 (JTAG) [6]

та успішно модифікується в такі стандарти як IEEE 1149.7 [7] та IEEE P1687 [8] (стандарт був затверджений як новий стандарт IEEE-SA Standards Board 3 листопада 2014 року [9]).

Існуючі рішення задачі тестування та ремонту логічних компонентів цифрових систем поділяються на три класифікації:

1. Дублювання логічних елементів або областей кристалу, що приводить до подвоєння апаратної реалізації функціональності. При фіксації несправного елементу або області здійснюється перемикання за допомогою мультиплексора на справний компонент [10]. Запропоновані Xilinx - американським розробником та виробником інтегральних мікросхем програмованої логіки - моделі FPGA (Field Programmable Gate Array) також застосовуються під час ремонту компонентів FPGA від компанії Altera. При ремонті основною одиницею вимірювання є стовпчик або рядок.

2. Використання генетичних алгоритмів для діагностування та відтворення працездатності на основі автономної реконфігурації кристалу FPGA без використання зовнішніх пристроїв керування. Надійність діагностування дефектів дорівнює 99%, час ремонту - 36 мілісекунд замість 660 секунд, необхідних для стандартного конфігурування проекту [11].

3. Відновлення працездатності кристалів FPGA не критичних за часом за допомогою заміни локальних CLB (Complex Logic Block) на надлишкові запасні компоненти запропоновано в [12,13]. Доступний рівень об'єднання CLB, що підлягає заміні, для критично важливих додатків складає приблизно тисячі логічних елементів.

Метою дослідження є аналіз існуючих засобів та методів пошуку дефектів у цифрових системах на кристалах, визначення їх головних недоліків та розроблення алгоритму методу тестування, що буде досконаліший за таких попередників, наприклад, як послідовний метод діагностики несправностей, умовний алгоритм пошуку дефектів за допомогою побудови дерева, автоматичні системи тестування фірм Logic Vision, Synopsys, Mentor Graphics, Candence.

Дедуктивно-паралельне моделювання несправності цифрових систем. Модель дедуктивно-паралельного синхронного аналізу несправностей дискретного об'єкту дозволяє вираховувати на двійковому тест-векторі всі дефекти за одну ітерацію обробки схеми.

$$L = T \oplus F, \quad (1.1)$$

де - $F = (F_{m+1}, F_{m+2}, \dots, F_i, \dots, F_n)(i = \overline{m+1, n})$ - сукупність функцій справної поведінки приладу;

m - число входів; $Y_i = F_i(X_{i1}, \dots, X_{ij}, \dots, X_{in_i})$ - n_i - вхідний i -й елемент схеми, що реалізує F_i для виявлення стану виходу Y_i на тест-векторі T_t ; X_{ij} - j -й вхід i -го елементу;

тест $T = (T_1, T_2, \dots, T_t, \dots, T_k)$ - впорядкована сукупність двійкових векторів, доведена в процесі справного моделювання на множині вхідних, внутрішніх та вихідних ліній (виходів), об'єднана в матрицю

$$T = [T_{ti}] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1i} & \dots & T_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{t1} & T_{t2} & \dots & T_{ti} & \dots & T_{tn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{k1} & T_{k2} & \dots & T_{ki} & \dots & T_{kn} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

невхідна координата якої визначається моделюванням функції; $T_{ti} = Y_i = F_i(X_{i1}, \dots, X_{ij}, \dots, X_{in_i})$ на тест-векторі T_t ; $L = (L_1, L_2, \dots, L_t, \dots, L_k)$ - множина дедуктивних схем або моделей, що визначаються виразом (1.1), де $L_t = (L_{t1}, L_{t2}, \dots, L_{ti}, \dots, L_{tn})$;

$$L_{ti} = T_i \oplus F_i, \quad (1.3)$$

- дедуктивна функція (ДФ) паралельного моделювання несправностей на тест-векторі T_t , яка відповідає справному елементу F_i , що дає можливість вираховувати список вхідних несправностей, що транспортуються на вихід елементів F_i [14].

Синхронність моделі (1.1) може бути виявлена умовою: $\Delta t = (t_{j+1} - t_j) \gg \tau \gg \tau_i$, коли інтервал часу між зміною вхідних наборів $(t_{j+1} - t_j)$, що подаються на схему, набагато більше максимальної затримки схеми елемента. Така методика використовується в технологіях моделювання та дозволяє виключити час як несуттєвий параметр [14].

У загальному випадку, коли функція елемента задана таблицею істинності, використання формули (1.1) дозволяє отримати таблицю транспортування несправностей для тест-вектору T_t , завдяки якій можливо записати ДФ моделювання дефектів.

Наприклад, на рисунку 1 перший доданок - тест-вектор, другий та третій - таблиці істинності та транспортування дефектів.

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline X_1 & X_2 & Y_1 \\ \hline 0 & 1 & 0 \\ \hline \end{array} \oplus \begin{array}{|c|c|c|} \hline X_1 & X_2 & Y_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline X_1 & X_2 & Y_1 \\ \hline 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

$$L_1 = X_1 X_2 \cup X_1 \bar{X}_2$$

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline X_1 & X_2 & Y_1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} \oplus \begin{array}{|c|c|c|} \hline X_1 & X_2 & Y_1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline X_1 & X_2 & Y_1 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array}$$

$$L_2 = X_1 X_2 \cup X_1 \bar{X}_2 \cup \bar{X}_1 X_2$$

Рис. 1 – ДФ моделювання дефектів

В даному випадку дедуктивні функції L_1 , L_2 записані у вигляді диз'юнктивної нормальної форми (ДНФ) по конститuentам одиниці таблиць транспортування дефектів.

Враховуючи розділення тесту на складові вектори рівняння (1.1), отримання ДФ для $T_t \in T$ приймає наступний вигляд: $L_t = T_t \oplus F$.

Якщо функціональний опис цифрового приладу представлений примітивами, що формують стан усіх ліній схеми, то наступний вираз виступає у якості формули перетворення справної моделі примітива F_i на тест-векторі T_i в дедуктивну функцію L_{ti} :

$$L_{ti} = T_t \oplus F_i = f_{ti}[(X_{i1} \oplus T_{t1}), (X_{i2} \oplus T_{t2}), \dots, (X_{ij} \oplus T_{tj}), \dots, (X_{in_i} \oplus T_{tn_i})] \oplus T_{ti} \quad (1.4)$$

Даний вираз є основою дедуктивного аналізу цифрових проектів [15, 16].

Практична реалізація виразу (1.4) зводиться до наступного алгоритму:

1. Визначення для тест-вектора $t = 0$, що обробляється, початкового значення індексу та ініціалізація векторів перевірених дефектів:

$$\forall i (D_i^0 = 0; D_i^1 = 0) \quad (1.5)$$

2. Визначення номеру наступного вхідного набору $t = t + 1$ для $T_t \in T$. Якщо $t > k$ (немає вхідних наборів), то кінець моделювання.

3. Справне моделювання всіх примітивів $F_i (i = \overline{1, n})$ схеми на вхідному наборі $T_t^X \in T_t$ з метою довизначення невхідних координат вектору $T_t^{\bar{X}} \in T_t$:

$$T_t^{\bar{X}} = f(T_t^X, F) \quad (1.6)$$

4. У відповідності до виразу 1.5 ініціалізація матриці дефектів, що перевіряються на тест-векторі $M = [M_{ij}]$. Ініціалізація вектору дефектів, що перевіряються, $\forall i (S_i^0 = 0; S_i^1 = 0)$. На основі

використання формули 1.4 реконфігурація всіх примітивів $F_i (i = \overline{1, n})$ з метою отримання дедуктивної схеми $L_t \leftarrow \forall i (L_{ti} = T_t \oplus F_i)$.

5. Паралельне моделювання несправностей з метою до визначення координат відповідних невідним лініям схеми шляхом виконання реєстрових операцій над рядками матриці дефектів M , що перевіряється, за допомогою отриманих дедуктивних функцій.

6. Формування векторів несправностей, що перевіряються, до всіх входів матриці відповідним вихідним лініям схеми за допомогою формули:

$$S^0 = \left(\bigcup_{\forall i \in Y} M_i \right) \cap T_t; S^1 = \left(\bigcup_{\forall i \in Y} M_i \right) \cap \bar{T}_t \quad (1.7)$$

7. Якість тест-вектора $T_t \in T$ при ідентичності списків несправностей у двох сусідніх ітераціях $(S^0 \cup S^1)^{r-1} = (S^0 \cup S^1)^r$ (де r - це індекс ітерації) визначається формулою:

$$Q(T_t) = \frac{1}{2n} [\sum_{i=1}^n (S_i^0 + S_i^1)] \quad (1.8)$$

та здійснюється перехід до наступного пункту. Інакше виконується виключення дефектів із процесу моделювання за правилом:

$$(S_i^0 = S_i^1 = 0) \leftarrow \forall i [(S_i^0 \cup S_i^1 = 1)^{r-1} \& (S_i^0 \cup S_i^1 = 0)^r] \quad (1.9)$$

якщо спостерігається зникнення несправностей, що перевіряються в ітерації r порівняно з $r-1$:

$$\exists i [(S_i^0 \cup S_i^1 = 1)^{r-1} \& (S_i^0 \cup S_i^1 = 0)^r] \quad (1.10)$$

перехід до пункту п'ять.

8. Формування векторів перевірених несправностей відповідно до виразу

$$D^0 = D^0 \cup S^0, D^1 = D^1 \cup S^1 \quad (1.11)$$

та визначення якості тесту за формулою:

$$Q(T_t) = \frac{1}{2n} [\sum_{i=1}^n (D_i^0 + D_i^1)] \quad (1.12)$$

На рисунку 2 представлений універсальний функціональний примітив (симулятор) дедуктивно-паралельного аналізу несправностей.

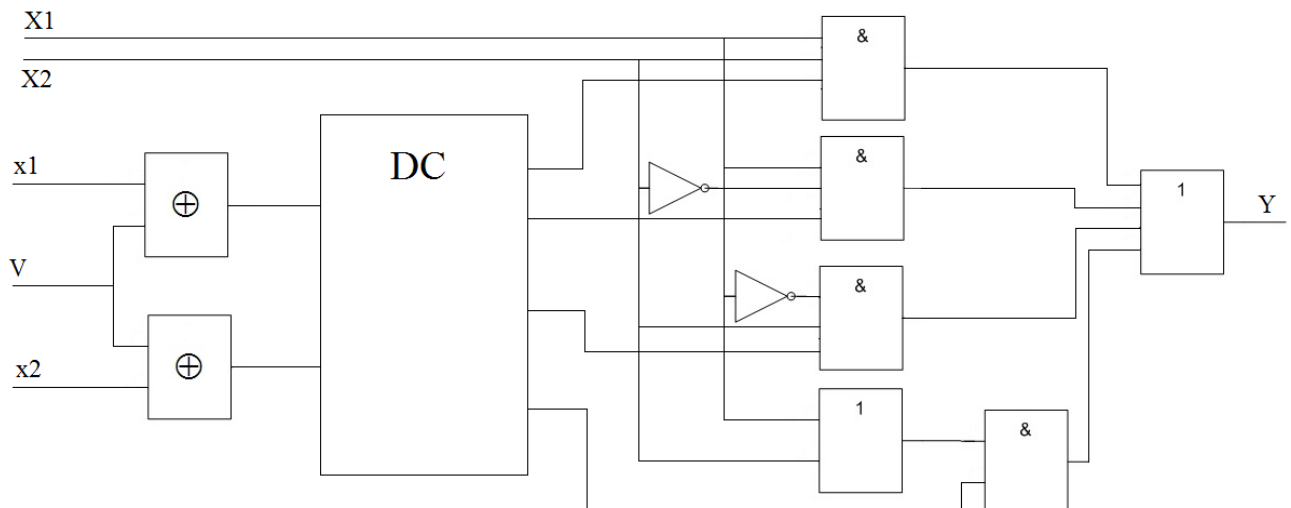


Рис. 2 – Симулятор несправних примітивів

У симуляторі представлені регістри (X_1 , X_2) та булеві (x_1 , x_2) входи, логічні функції (елементи І та АБО) вихідна регістрова змінна Y .

Таблиця 1 ілюструє паралельне моделювання вхідних 4-розрядних векторів несправностей для отримання на виході Y множини дефектів для логічних елементів, що перевіряються.

Таблиця 1 – Паралельне моделювання вхідних 4-розрядних векторів несправностей

I/АБО	x_1x_2	X_1	X_2	Y
0	00	0111	1011	0011
1	00	0111	1011	1111
0	11	0101	0110	0111
1	11	1101	0111	0101

Даний симулятор дає можливість трансформувати вентильну модель F справної поведінки схеми у дедуктивну модель L , що не передбачає в процесі моделювання використання вентильної моделі.

Як апаратна модель ДФ симулятор орієнтований на створення вбудованих засобів дедуктивно-паралельного моделювання, що в порівнянні з програмною реалізацією підвищує швидкодію аналізу в 10-1000 разів.

Модель дедуктивно-паралельного аналізу представлена на рисунку 3.

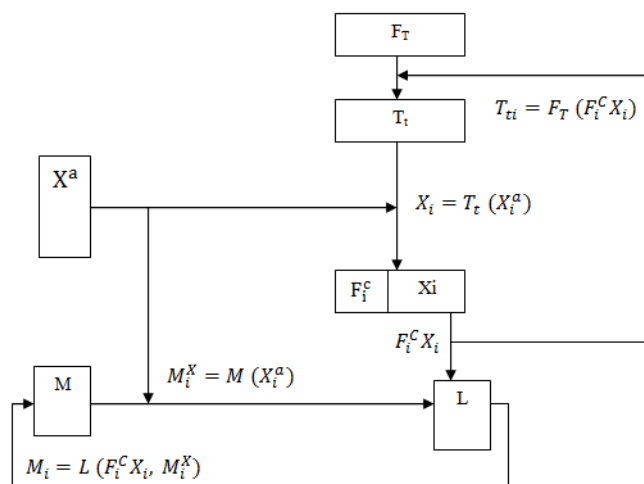


Рис. 3 – Модель дедуктивно-паралельного аналізу

де M і L - два додаткових модулі; Y_i - вихід логічного елементу; F_i^C - двійковий код елементу або його ідентифікатор; F_T - таблиця істинності сукупності булевих функцій для опису елементів схеми; $(F_i^C * X_i)$ - вхідний набір; $M_i = L(F_i^C X_i, M_i^X)$ - отриманий з F аналітичний вираз для визначення векторів несправностей, що перевіряються, об'єднаних в матрицю M за допомогою набору дедуктивних функцій L .

Дедуктивно-паралельний аналіз дефектів орієнтований на обробку великих проектів вентильного та регістрового рівня опису з метою отримання таблиці несправностей та оцінки якості покриття тестом дефектів заданого класу. Об'єкт тестування представлений у формі структур, таблиць, булевих рівнянь, кубічних покриттів та реалізує складну цифрову систему, вбудовану в кристали SoC.

В даному випадку технологічно розглядати процедури синтезу на основі аналітичної форми. При цьому логічний елемент з двома вхідними лініями перетворюється на елемент з чотирма вхідними лініями, де x_1 , x_2 - булеві входи, а a і b - додаткові регістри. Регістрові входи служать для транспортування списків несправностей, а булеві (керуючі) - для виконання операцій над зовнішніми списками дефектів.

В таблиці 2 представлений синтез логічного елементу АБО.

Таблиця 2 – Синтез логічного елементу АБО

$L = f(x, y, a, b) =$	$(x, y) \backslash (a, b)$	00	01	11	10
	00	0	1	1	1
	01	0	1	0	0
	11	0	0	1	0
	10	0	0	0	1

Мінімізація примітиву з таблиці 2 приводить до формування трьох дедуктивних функцій різної складності розв'язання.

$$\begin{aligned}
 1) L = f(x, y, a, b) &= (\bar{x}\bar{y} \cap ab) \cup (y \cap a\bar{b}) \cup (x \cap \bar{a}b) \cup (xy \cap b) \cup (xy \cap a) = \\
 &= (\bar{x}\bar{y} \cap ab) \cup (x \cap \bar{a}b) \cup (y \cap a\bar{b}) \cup [(xy \cap (a \cup b))] \\
 2) L = f(x, y, a, b) &= (\bar{x}\bar{y} \cap ab) \cup (y \cap a\bar{b}) \cup (x \cap \bar{a}b) \cup (xy \cap a) = \\
 &= (\bar{x}\bar{y} \cap ab) \cup (x \cap \bar{a}b) \cup [(ya \cap (x \cup \bar{b}))] \\
 3) L = f(x, y, a, b) &= (\bar{x}\bar{y} \cap ab) \cup (y \cap a\bar{b}) \cup (x \cap \bar{a}b) \cup (xy \cap b) \cup (xy \cap a) = \\
 &= (\bar{x}\bar{y} \cap ab) \cup [(ya \cap (x \cup \bar{b})) \cup [(xb \cap (y \cup \bar{a}))].
 \end{aligned}
 \tag{1.13}$$

Результати мінімальних по Квайну функцій апаратно реалізуються у наступні схеми: на рисунку 4 представлена схема дедуктивного примітиву елементу АБО, на рисунку 5 - елементу І, а на рисунку 6 - елементу виключне АБО (операція за модулем 2 - XOR).

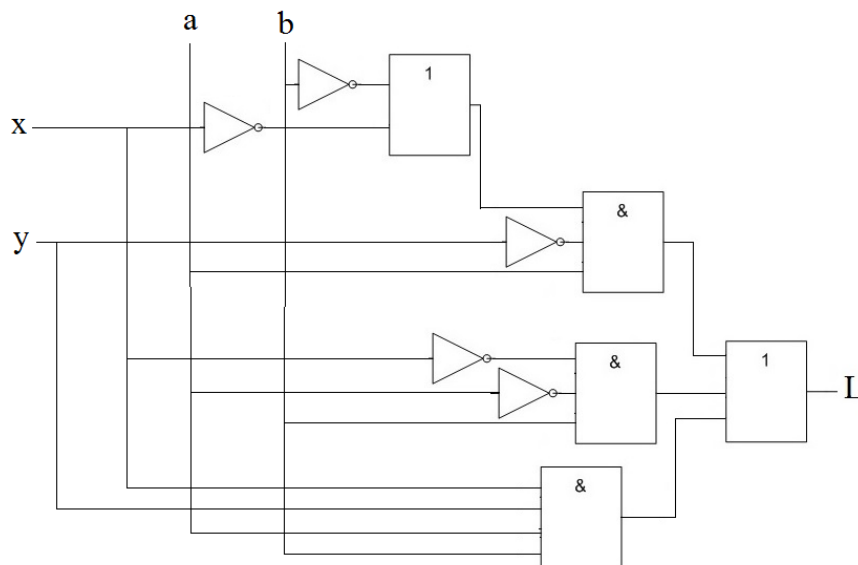


Рис. 4 – Схема дедуктивного примітиву елементу АБО

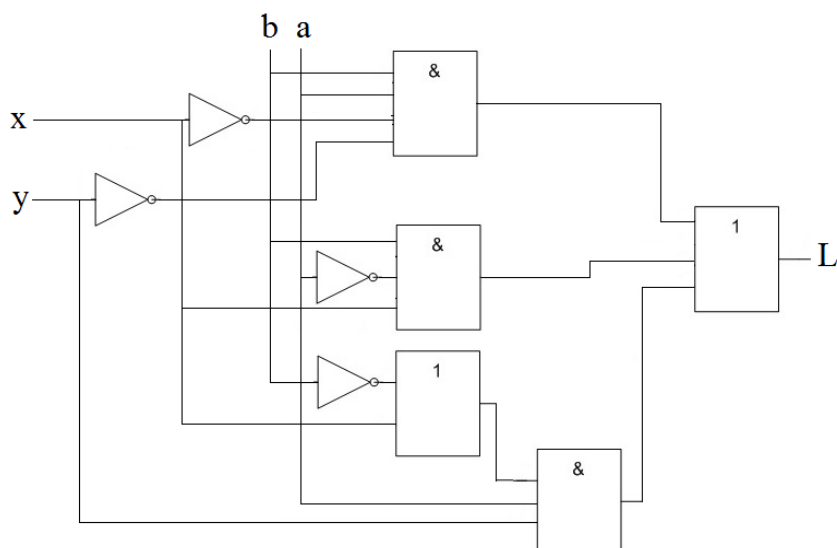


Рис. 5 – Схема дедуктивного примітиву елементу I

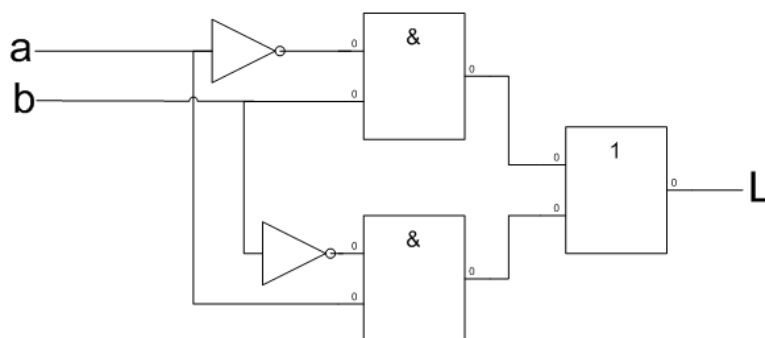


Рис. 6 – Схема дедуктивного примітиву елементу XOR

Регістровий рівень опису компонентів цифрової системи відрізняється функціональною складністю, що впливає на розмір таблиць істинності та кубічних покриттів. На цьому рівні розглядаються такі функціональності, як тригери, засувки, лічильники, регістри, мультиплексори, шинні структури.

Наприклад, синтез дедуктивної функції D-тригера з трьома булевими та трьома регістровими вхідними лініям $Q = DC \cup \bar{C}\bar{D}Q(t-1)$, функція якого представлена картою Карно в таблиці 3.

Таблиця 3 – Синтез дедуктивної функції D-тригера

L = (T,X)	(T)\(X)	000	001	011	010	110	111	101	100
	000	0	1	1	0	1	1	0	0
	001	0	1	1	0	0	0	1	1
	011	0	1	1	0	1	1	0	0
	010	0	1	1	0	0	0	1	1
	110	0	0	1	1	1	0	0	1
	111	0	0	1	1	0	1	1	0
	101	0	0	1	1	1	0	0	1
	100	0	0	1	1	0	1	1	0

$$\begin{aligned}
 L = f(c, d, q, C, D, Q) = & (\bar{c} \cap \bar{C}\bar{D}Q) \cup (\bar{C}\bar{D}Q) \cup (c \cap \bar{C}D\bar{Q}) \cup \\
 & \cup (\bar{c}\bar{d}\bar{q} \cap CD) \cup (\bar{c}\bar{d}q \cap C\bar{D}) \cup (\bar{c}d\bar{q} \cap CD) \cup (\bar{c}d\bar{q} \cap C\bar{D}) \\
 & \cup (cd\bar{q} \cap C\bar{Q}) \cup (cdq \cap CQ) \cup (c\bar{d}q \cap C\bar{Q}) \cup (c\bar{d}\bar{q} \cap CQ)
 \end{aligned}
 \tag{1.14}$$

Висновки. Проведений аналіз існуючих засобів та методів пошуку дефектів у цифрових системах на кристалах та їх класифікація за трьома основними ознаками. Запропонований дедуктивний аналіз дефектів, що об'єднує в собі переваги дедуктивного виявлення списків несправностей, ефективного з точки зору математики, та виконання паралельних процедур, що орієнтовані на високошвидкісну обробку цифрових приладів вентильного, системного та реєстрового рівня опису.

Список бібліографічного опису

1. Ziad Noun. Wireless Approach for SIP and SOC Testing. Micro and nanotechnologies/Microelectronics. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc. English. URL: https://theses.hal.science/file/index/docid/512832/filename/Ziad_Noun_-_Wireless_Approach_for_SiP_and_SoC_testing.pdf (Дата звернення 05.05.2023).
2. Литвинова Е.И. Технологии встроенного тестирования system-in-package. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-vstroennogo-testirovaniya-system-in-package> (Дата звернення 10.05.2023).
3. Каравай М.Ф. Алгоритм построения проверяющего теста для кратных неисправностей по структуре комбинационного устройства. URL: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=at&paperid=7778&option_lang=rus (Дата звернення 15.05.2023).
4. Олиховский С. И., Белова М. М., Кочелаб Е. В. Кинетика образования и роста микродефектов в кристаллах. URL: <https://www.researchgate.net/..../Kinetics-of-nucleation-and-growth-of-microdefects-in-crystals-in-Russian.pdf> (Дата звернення 15.05.2023).
5. Appello D., Bernardi P., Grosso M., Reorda M.S. System-in-package testing: problems and solutions // IEEE Design & Test of Computers. Vol. 23, Issue 3. May-June, 2021. P. 203 – 211.
6. Городецкий Ами Встроенные инструменты тестирования. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vstroennye-instrumenty-testirovaniya> (Дата звернення: 23.05.2023).
7. Городецкий Ами Новый JTAG-стандарт IEEE 1149.7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novyy-jtag-standart-ieee-1149-7> (Дата звернення: 23.05.2023).
8. Farrokh Ghani Zadegan, Urban Ingelsson, Gunnar Carlsson and Erik Larsson. Design Automation for IEEE P1687. URL: https://www.ida.liu.se/labs/eslab/publications/pap/db/farza_DATE11.pdf (Дата звернення 15.05.2023).
9. 1687 Proposed Hardware Architecture. URL: https://grouper.ieee.org/groups/1687/HW_Post_Vote_r7_BW.pdf . (Дата звернення 15.05.2023).
10. Subhasish M.S, Huang W.-J., Saxena N.R., Yu S.-Y., McCluskey E.J. Reconfigurable architecture for autonomous self-repair // IEEE Design & Test of Computers. - Volume 21, Issue 3. - May, 2019. -P.228-240.
11. Ross R., Hall R. A FPGA Simulation Using Asexual Genetic Algorithms for Integrated Self-Repair // Adaptive Hardware and Systems, 2018. -AHS 2018 - First NASA/ESA Conference on Volume.- Issue 15-18 June 2018. - P. 301-304
12. Habermann S., Kothe R., Vierhaus H.T. Built-in self repair by reconfiguration of FPGAs // Proceeding of the 12th IEEE International Symposium on On-Line Testing. - 2020. - P. 187-188.
13. Pontarelli, M. Ottavi, V. Vankamamidi, A. Salsano, F Lombardi. Reliability Evaluation of Repairable/Reconfigurable FPGAs // 21st IEEE International Symposium on Defect and Fault-Tolerance in VLSI Systems (DFT'21)/- October, 2021. - P. 227-235.
14. Hahanov V.I., Babich A.V., Hyduke S.M. Test Generation and Fault Simulation Methods on the Basis of Cubic Algebra for Digital Devices // Proceeding of the Euromicro Symposium on Digital System Design DSD2010/ - Warsaw, Poland. - September, 4-6, 2010. - P. 228-235.
15. Abramovici M., Breuer M.A. and Friedman A.D. Digital systems testing and testable design. - Computer Science Press. - 2022. - 652 p.

References

1. Ziad Noun. Wireless Approach for SIP and SOC Testing. Micro and nanotechnologies/Microelectronics. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc. English. URL: https://theses.hal.science/file/index/docid/512832/filename/Ziad_Noun_-_Wireless_Approach_for_SiP_and_SoC_testing.pdf (Accessed 05/05/2023).
2. Litvynova E.I. Technologies of built-in system-in-package testing. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-vstroennogo-testirovaniya-system-in-package> (Access date 05/10/2023).
3. Karavai M.F. Algorithm for building a verification test for multiple malfunctions based on the structure of a combinational device. URL: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=at&paperid=7778&option_lang=rus (Access date 05/15/2023).
4. Olikhovskiy S.Y., Belova M.M., Kochelab E.V. Kinetics of formation and growth of microdefects in crystals. URL: <https://www.researchgate.net/..../Kinetics-of-nucleation-and-growth-of-microdefects-in-crystals-in-Russian.pdf> (Accessed 05/15/2023).
5. Appello D., Bernardi P., Grosso M., Reorda M.S. System-in-package testing: problems and solutions // IEEE Design & Test of Computers. Vol. 23, Issue 3. May-June, 2021. P. 203-211.

6. Horodetsky Ami Built-in testing tools. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vstroennye-instrumenty-testirovaniya> (Access date: 05/23/2023).
7. Horodetsky Ami New JTAG standard IEEE 1149. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novyy-jtag-standart-ieee-1149-7> (Access date: 05/23/2023).
- 8 Farrokh Ghani Zadegan, Urban Ingelsson, Gunnar Carlsson and Erik Larsson. Design Automation for IEEE P1687. URL: https://www.ida.liu.se/labs/eslab/publications/pap/db/farza_DATE11.pdf (Date accessed 05/15/2023).
9. 1687 Proposed Hardware Architecture. URL: https://grouper.ieee.org/groups/1687/HW_Post_Vote_r7_BW.pdf . (Date of application 05/15/2023).
10. Subhasish M.S., Huang W.-J., Saxena N.R., Yu S.-Y., McCluskey E.J. Reconfigurable architecture for autonomous self-repair // IEEE Design & Test of Computers. - Volume 21, Issue 3. - May, 2019. - P.228-240.
11. Ross R., Hall R. A FPGA Simulation Using Asexual Genetic Algorithms for Integrated Self-Repair // Adaptive Hardware and Systems, 2018. -AHS 2018 - First NASA/ESA Conference on Volume.- Issue 15-18 June 2018. - P. 301-304
12. Habermann S., Kothe R., Vierhaus H.T. Built-in self repair by reconfiguration of FPGAs // Proceeding of the 12th IEEE International Symposium on On-Line Testing. - 2020. - P. 187-188.
13. Pontarelli, M. Ottavi, V. Vankamamidi, A. Salsano, F. Lombardi. Reliability Evaluation of Repairable/Reconfigurable FPGAs // 21st IEEE International Symposium on Defect and Fault-Tolerance in VLSI Systems (DFT'21)/- October, 2021. - P. 227-235.
14. Hahanov V.I., Babich A.V., Hyduke S.M. Test Generation and Fault Simulation Methods on the Basis of Cubic Algebra for Digital Devices // Proceeding of the Euromicro Symposium on Digital System Design DSD2010/ - Warsaw, Poland. - September, 4-6, 2010. - P. 228-235.
15. Abramovici M., Breuer M.A. and Friedman A.D. Digital systems testing and testable design. - Computer Science Press. - 2022. - 652 p.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-07>

УДК 61:004.45

Лук'янюк Світлана Василівна, науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0002-7469-8144>

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, м. Київ, Україна

ЩОДО ПИТАННЯ ХМАРНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБІГУ ПРИ ВИКОНАННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ

Лук'янюк С.В. Щодо питання хмарного електронного документообігу при виконанні науково-дослідних робіт. У статті розкрито основи електронного документообігу при виконанні науково-дослідних робіт на основі хмари. Зазначено, що помітний вплив на структуру та параметри системи електронного документообігу має предметна область, для якої розробляється інформаційна система. Наголошується, що для успішної реалізації системи електронного документообігу необхідно використовувати системний підхід до аналізу бізнес-процесів, що протікають у предметній галузі, визначити специфічні властивості об'єктів і суб'єктів документообігу, сформулювати перелік розв'язуваних завдань і розробити функціональну модель системи. Основним чинником, стримуючим поширення хмарних технологій, зокрема і хмарних СЕД, на території України, є обмеження каналів зв'язку й переважно – недостатній рівень розвитку широкопasmового доступу. Наголошується, що хмарні технології не гарантують безперервності та безпеку інтерактивного режиму взаємодії користувачів з системою електронного документообігу, не забезпечують персональні дані та науково-дослідні інформаційні ресурси необхідним комплексним захистом. Однак, підкреслено, що система електронного документообігу, заснована на хмарних технологіях, може повною мірою використовувати хмарне сховище, хмарну безпеку та технології хмарних обчислень для досягнення уніфікованого, надійного та безпечного електронного документообігу. Проведено дослідження, стосовно розповсюдження науково-дослідних робіт у найбільш розповсюдженій вільній пошуковій системі, яка індексує повний текст наукових робіт – Google Scholars. Зазначено робочий процес механізму пошуку у системі та досліджено систематичний науковий потенціал, щодо застосування хмарних технологій у системі електронного документообігу.

Ключові слова: хмарні технології, електронний документообіг, науково-дослідна робота, інновації, впровадження, інформація, керування.

Lukianiuk S. The issue of cloud-based electronic document circulation in the performance of research works. The article discloses the basics of electronic document flow when performing scientific research works on the basis of the cloud. It is noted that the subject area for which the information system is being developed has a significant impact on the structure and parameters of the electronic document management system. It is emphasized that for the successful implementation of the electronic document flow system, it is necessary to use a systematic approach to the analysis of business processes occurring in the subject field, to determine the specific properties of objects and subjects of document flow, to formulate a list of solved tasks and to develop a functional model of the system. The main factor restraining the spread of cloud technologies, in particular, cloud SEDs, in the territory of Ukraine, is the limitation of communication channels and mainly the insufficient level of development of broadband access. It is emphasized that cloud technologies do not guarantee the continuity and security of the interactive mode of interaction of users with the electronic document management system, do not provide personal data and research information resources with the necessary comprehensive protection. However, it is emphasized that an electronic document management system based on cloud technologies can make full use of cloud storage, cloud security and cloud computing technologies to achieve unified, reliable and secure electronic document management. A study was conducted on the distribution of scientific research works in the most widespread free search engine that indexes the full text of scientific works - Google Scholars. The working process of the search mechanism in the system is specified and the systematic scientific potential of the application of cloud technologies in the electronic document management system is investigated.

Key words: cloud technologies, electronic document management, research, innovation, implementation, information, management.

Вступ та постановка проблеми. Значний розвиток технологій та інформації припали на епоху глобалізації. Використання технологій в управлінні інформацією є дуже важливим разом із промисловою революцією в основі якої лежить штучний інтелект. Поява різноманітних документів і носіїв для зберігання, пошуку та розповсюдження інформації вимагає трансформації технології управління інформацією. Цифрова трансформація відзначається закінченням життєвого циклу певних бізнес-моделей, викликаних новими парадигмами, такими як хмарні обчислення, великі дані та промислова революція. Ця трансформація заохочує традиційні організації використовувати технологічні платформи для своїх бізнес-процесів, щоб вижити в епоху цифрового підриву. Запровадження нових цифрових технологій призводить до суттєвих змін у бізнес-процесах, організаціях, сферах діяльності та суспільних змін у бізнес-організаціях, а також їх робочому середовищі.

У якості тенденції, яка все ще розвивається, технологія хмарних обчислень представлена як спроба забезпечити доступ до інформації звідусіль через мережу Інтернет. Ця нова технологія може подолати обмеження попередніх технологій та розширити спектр застосування. Хмарні обчислення забезпечують простий і прозорий доступ до інфраструктури зберігання даних через служби, що, у

© Лук'янюк С.В.

свою чергу пропонує кілька переваг, включаючи доступ до керованого сховища без наявності спеціаліста зі зберігання, зменшення потреби у фізичному просторі для зберігання, гнучкість доступу тощо. Хмарна електронна система керування файлами – це система, де кожна підсистема в організації може реалізувати спільне з'єднання через мережу хмарної платформи. Верхня і нижня системи можуть мати комунікації в реальному часі через мережу. Що призведе до реалізації логічної концентрації та розподілу електронного керування файлами, а також максимізує ефективність електронного документообігу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формулювання наукової думки в окресі електронного документообігу є різномірним та масштабним. У сучасній науковій площині з'являються роботи присвячені механізмам та принципам застосування електронного документообігу у сфері науково-дослідних робіт.

С. М. Тукало [1] зазначив, що основна частина документообігу в наукових установах пов'язана з проведенням науково-дослідних робіт. У зв'язку з цим автором було визначено вимоги до СЕД наукової установи, узагальнено основні цілі та подано типовий перелік задач сучасної СЕД, що включає функціонал традиційного документообігу.

Л. Шимченко [2] розкрила принципи впровадження електронного документообігу в публічному управлінні як складової підвищення ефективності та прозорості діяльності органів державної влади. Авторка наголошує, що електронний документообіг виступає ефективним інструментом організації та адміністрування інформації, на основі якої і відбуваються управлінські процеси.

Грунтовною є праця [3] Х. В. Середи. Науковцем досліджено сутність, механізми та сучасні підходи до модернізації електронного документообігу. Вивчено основні вимоги до механізмів упровадження електронного документообігу в діяльність наукових установ галузі освіти. Розглянуто тенденції розвитку інтероперабельності як одного з головних завдань для розвитку електронного урядування в Україні. Виокремлено низку проблем, які сьогодні перешкоджають розвитку в Україні цифрових трендів.

О.М. Перегуда, О.П. Черкес, П.М. Піонтківський, В.В. Гордійчук та А.В. Шишацький [4] запропонували методику впровадження інформаційних систем в наукову та науково-технічну діяльність наукових (освітніх) установ (організацій, підрозділів), навели її основні положення та результати апробації.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Justina Ikuomola, Oyekan Ezekiel, Orogbemi Olutomisin [5], Han Jin, Wang Cheng, Miao Jie, Lu Mingxin, Wang Yingchun, Jin Shi [6], Atal Christina, Angala Mark, Fernandez Flordeliza, Lacsina Charvin [7], Shillaker Simon, Segarra Carlos, Mappoura Eleftheria, Fournial Mayeul, Vilanova Lluís, Pietzuch Peter [8], Li Kun, Li Zhichun, Chen Yuetao, Wang Zixuan, Zhang Yiwei, Yuan Liang, Jia, Haipeng, Zhang, Yunquan, Cao Ting, Yang Mao [9], Singh Divyanshu, Deepak Gerard [10], Huang Qinlong, Wei Qinglin, Yan Guanyu, Zou Lin, Yang Yixian [11], Muliantara Agus, ER Ngurah Agus Sanjaya, Widiarth I., Setiawan I Made Agus [12], Qəmbərli İlkin [13], Mousse Mikael [14] та інші.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за окресленою тематикою, питання розкриття основ електронного документообігу при виконанні науково-дослідних робіт на основі хмари залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Розкрити основи електронного документообігу при виконанні науково-дослідних робіт на основі хмари.

Викладення основного матеріалу дослідження. Ґрунтуючись на принципах розвитку системи електронного документообігу (СЕД), електронні документи – це продукти технологічних розробок, які створюються та можуть зчитуватися комп'ютерами, записуються як цифрова інформація та можуть використовуватися як вимоги до файлів. Щоб підвищити ефективність і результативність управління електронними документами, система електронного документообігу виникла як інклюзивна система отримання та зберігання електронних документів, що забезпечує автентичність, надійність, цілісність і доступність документів у процесі пошуку. Система електронного документообігу на основі хмарних обчислень забезпечує інтегроване керування електронними документами, зберігання електронних документів у хмарі, вирішення передачі, обмін електронними документами та впровадження інтегрованих служб електронних документів.

Для підтримки цифрового документообігу в організації чи компанії потрібен технологічний документообіг. СЕД є однією зі стратегій, яку можуть прийняти компанії, які сприяли зменшенню виникнення проблем, пов'язаних з керуванням паперовими документами, що стосуються доступу

до інформації, пошкодженням через безперервне поводження або через неправильні умови зберігання та навіть втрату інформації.

Враховуючи різноманітні переваги хмарних обчислень, на сьогодні багато компаній інтегрували власні сховища даних у хмарні системи. Однак враховуючи всі переваги варто наголосити на ризиках, таких як залежність від третіх сторін, втрата суверенітету даних, а також ризики конфіденційності та безпеки.

Дане дослідження базується на можливостях та проблемах використання хмарних обчислень в управлінні електронними документами.

Науково-дослідна робота – це робота наукового характеру, пов'язана з науковим пошуком, проведенням досліджень, експериментами з метою розширення наявних та отримання нових знань, перевірки наукових гіпотез, встановлення закономірностей, наукових узагальнень та обґрунтувань.

На сьогодні, на території України, найбільш розповсюдженою вільною пошуковою системою, яка індексує повний текст наукових робіт є Google Scholars. Дослідження проводилося із використанням Google Scholars за пошуком у рамках з 2017 по 2022 рік, тобто за останні 5 років, включаючи ідентифікацію, аналіз і відбір статей для рецензування.

Так у базі Google Scholars знайдено 208 журнальних статей, пов'язаних із пошуковими ключовими словами (науково-дослідна робота, хмарні обчислення, електронний документообіг), 14 статті-дублікати, 163 статі, які не стосуються фокусу пошуку, 8 частково недоступні статі і 3 статі, які не використовували українську мову. Результатом є відокремлення 20 статей, які будуть розглянуті у подальшому. Робочий процес механізму пошуку, використаний у цьому дослідженні, показаний на рисунку 1.

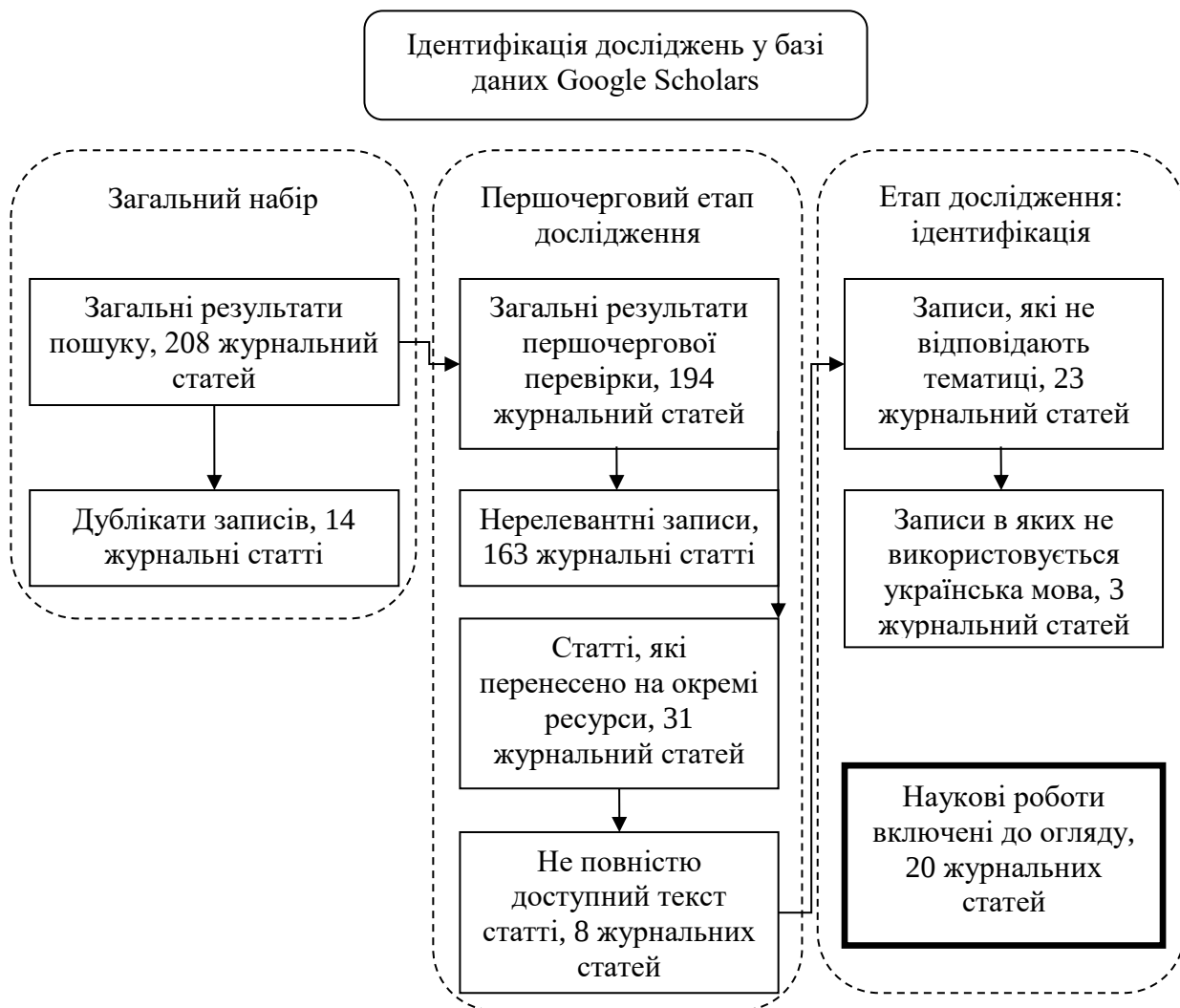


Рис. 1 – Робочий процес механізму пошуку

Далі відібрані наукові роботи оцінювались відповідно до якості викладеного матеріалу та його повноти за наступною схемою: повністю відповідає тематиці = 3; частково = 2; не відповідає = 1.

На основі зібраних даних і оцінки якості результату пошуку результат оцінки показує, що шість статей мають значення 1 (НДР6, НДР7, НДР8, НДР9, НДР11, НДР20), одна стаття має значення 1,5 (НДР1), дев'ять статей мають значення 2 (НДР2, НДР3, НДР4, НДР5, НДР10, НДР15, НДР17, НДР18, НДР19), а чотири статті мають значення 3 (НДР12, НДР13, НДР14, НДР16). Це показано на рисунку 2.

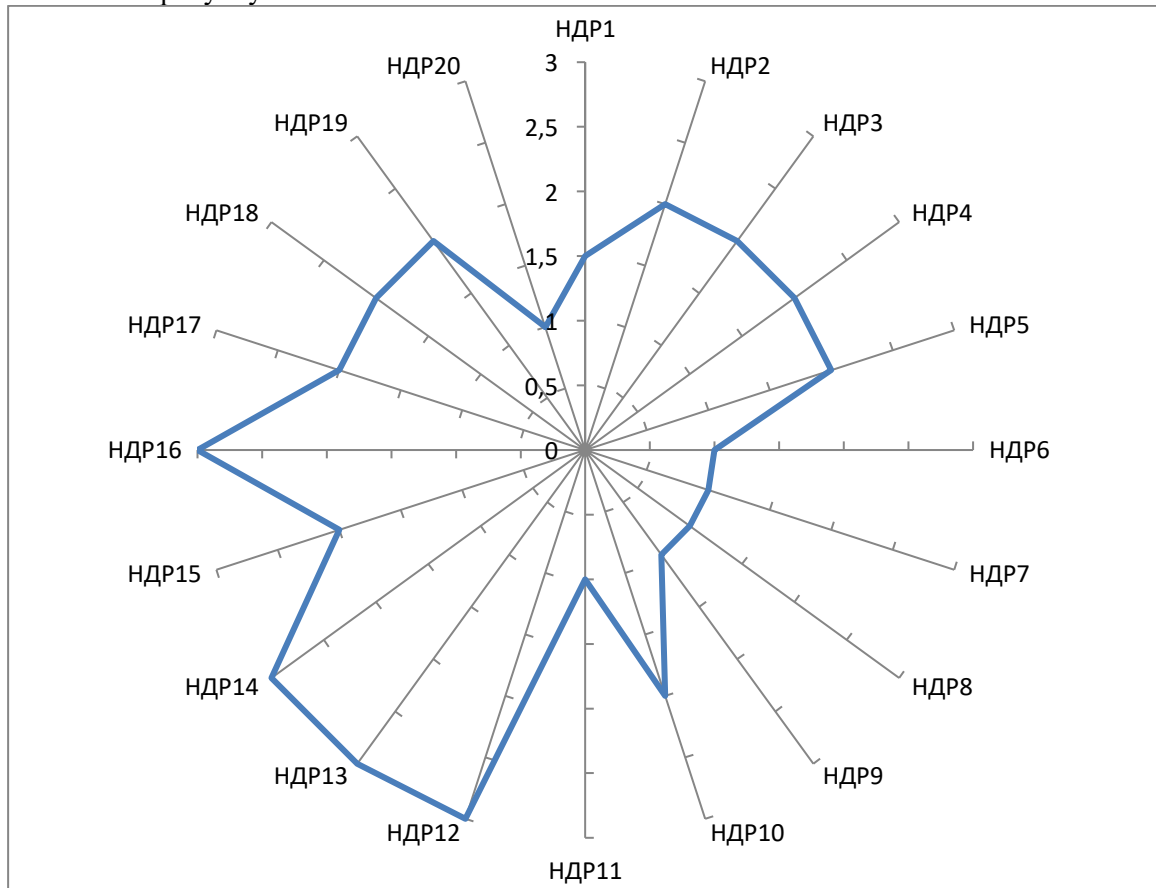


Рис. 2 – Результати оцінювання якості пошуку

За результатами аналізу відібраних статей було виявлено, що найбільш широко використовуваною моделлю хмарних обчислень є приватна хмара із загальною кількістю 11 статей (НДР1, НДР2, НДР5, НДР7, НДР9, НДР10, НДР12, НДР15, НДР16, НДР17, НДР19). 6 статей стосуються публічної хмари, а 3 статті стосуються гібридної хмари, як показано на рисунку 3.

Приватна хмара використовується ширше порівняно з іншими моделями послуг, оскільки вона вважається більш надійною з точки зору безпеки. Під час керування електронними документами приватні хмари забезпечують безпечний обмін документами в мережі, якою можуть керувати користувачі. Переваги приватної хмари:

- персональне середовище, це означає, що всі дані та документи, які знаходяться в приватній хмарі, захищені від стороннього доступу;
- захист, приватна хмара захищає всю конфіденційну інформацію та робить її більш безпечною. Крім того, організації також можуть застосовувати конфігурації або параметри, змінюючи безпеку відповідно до своїх політик і потреб;
- наявність програмного та апаратного забезпечення в одному місці сприятиме виконанню функцій розподілу за масштабністю.



Рис. 3 – Результати аналізу моделі служби хмарних обчислень під час виконання електронного пошуку науково-дослідних робіт

За результатами аналізу відібраних статей було встановлено, що існує кілька можливостей використання хмарних обчислень в електронному документообігу, в тому числі наявність репозиторію документів, де впровадження хмарної СЕД забезпечить зберігання документів в репозиторії (НДР2). Крім того, у статті (НДР7) також було виявлено, що керування електронними документами на основі хмарних обчислень дозволяє адміністраторам організовувати та підтримувати організовану структуру папок, щоб документи та файли розміщувалися в папках відповідно до їх класифікації. Контроль доступу також є перевагою хмарного електронного документообігу. Завдяки контролю доступу система може відстежувати процеси реєстрації та виписки, щоб контролювати сторони, які в даний момент отримують доступ або редагують документи, показані в 4 вибраних статтях, а саме (НДР5, НДР8, НДР14 і НДР17). Це також стосується можливості контролю версій у статті (НДР13), де система відстежуватиме будь-які зміни, які відбуваються в документі. Контроль версій, безсумнівно, запобіжить процесу неавторизованих змін або втрати документів у цифровому середовищі.

Інтеграція СЕД з бізнес-процесами або організаційними робочими процесами також забезпечує швидкий і повний пошук і виконує представлення інформації, доступ і використання інформації більш ніж одним користувачем (багатокористувацьким) одночасно, більш централізоване зберігання інформації та високу точність. Це показано у 8 вибраних статтях, а саме (НДР4, НДР6, НДР9, НДР10, НДР11, НДР12, НДР15 і НДР20). Крім того, інші 5 вибраних статей, а саме (НДР1, НДР3, НДР16, НДР18 і НДР19), також відкривають можливості для користувачів скористатися перевагами хмарних обчислень, а саме надання можливості співпраці в режимі реального часу, а саме можливості виконувати спільні дії, тобто редагування документів одночасно кількома людьми через веб-браузер.

На основі результатів аналізу кількох вибраних статей було виявлено декілька проблем у використанні хмарних обчислень для керування електронними документами, які були показані в 11 вибраних статтях (НДР2, НДР4, НДР6, НДР10, НДР14, НДР15, НДР16, НДР17, НДР18, НДР19, НДР20), включаючи залежність від третіх сторін, системні збої, компанії чи організації, які використовують технологічні системи для своєї операційної діяльності, схильні до помилок підключення або збою сервера. Крім того, виклики з точки зору безпеки даних показано в 9 вибраних статтях, а саме (НДР1, НДР3, НДР5, НДР7, НДР8, НДР9, НДР11, НДР12 і НДР13), де системи управління документами на основі цифрових технологій схильні до втрат, спричинених внутрішніми сторонами, такими як людська помилка (включаючи навмисне чи ненавмисне видалення та зміну документів), або маніпуляція та прослуховування даних зовнішніми сторонами.

Деякі з можливостей і переваг впровадження електронного документообігу на основі хмарних обчислень включають:

- хмарне зберігання, доступна інфраструктура підтримує зберігання документів у сховищі, яке також можна інтегрувати з робочим процесом організації, це може підвищити ефективність роботи;
- підвищення продуктивності бізнес-процесів, хмарна СЕД може допомогти підвищити продуктивність працівників, де працівники можуть швидше й точніше отримувати доступ до інформації та діяти на основі неї;

- мінімізація часу відгуку бізнес-процесу. Пошук файлів документів, оновлення документів і розповсюдження цифрових документів можна виконувати набагато швидше за допомогою хмарної СЕД;
- мінімізація загальної вартості документів і максимізація ефективності зберігання;
- зменшення фінансової складової. Завдяки впровадженню СЕД накладні витрати на зберігання звичайних документів, таких як папір, фотокопії та картотечні шафи, можна скоротити до нуля відсотків;
- мінімізація ризику втрати чи пошкодження документів;
- зручний обмін документами. Використання документів може здійснюватися одночасно декількома користувачами та дозволяє співпрацювати між підсистемами.

Організація документообігу в електронному вигляді, викликає такі проблеми, як зберігання електронних документів, що збільшує ризик несанкціонованого доступу, а також загрозу відтворення або дублювання інформації, що зберігається в документах, тому вимоги щодо забезпечення безпеки документів і доступу є більш суворими. Щоб захистити цілісність, цілісність, автентичність і надійність документів, необхідно враховувати кілька аспектів, наприклад

1) Автентифікація, яка стосується ідентифікації користувача. Ідентифікація має відбуватися двонаправлено, сервери в центрах обробки даних повинні автентифікувати користувачів (автоматизовані робочі станції), а користувачі також повинні автентифікуватися на серверах. Автентифікація повинна виконуватися кожного разу, коли робоча станція підключається до центру обробки даних.

2) Контроль доступу, який включає визначення прав доступу до кожної підсистеми в організації. Такі як зберігачі, які мають право лише записувати інформацію, читачі, які мають доступ лише до читання інформації, автори, які мають права доступу для створення нових документів і читання документів, які були створені, і редактори, які мають право читати, писати та редагувати документи та менеджери, які мають загальний доступ, включаючи видалення інших користувачів зі списку контролю доступу.

3) Шифрування, передбачає кодування інформації. За допомогою шифрування інформація, що міститься в документі, не може бути безпосередньо прочитана сторонніми особами. Шифрування захищає всі документи, що зберігаються в певних сховищах інформації, від доступу будь-кого, за винятком певних користувачів, які мають ідентифікатор і пароль, що використовуються під час шифрування.

4) Цифровий підпис необхідний у випадках, коли користувачеві потрібно переконатися, що отримана інформація була надіслана конкретним відправником. Цифрові підписи забезпечують гарантію та параметри спільної автентифікації.

Щоб захистити автентичність, повноваження та контроль доступу для керування електронними документами за допомогою хмарних обчислень, організація повинна підвищити безпеку даних, підтримуючи:

1) Конфіденційність, організація повинна перевірити вразливі місця, щоб захистити дані від кібератак або зловмисних користувачів.

2) Цілісність. Організації повинні підтримувати та захищати свої доступні ресурси, такі як документи чи дані клієнтів.

3) Доступність. Організація повинна гарантувати, що всі ресурси доступні, коли це необхідно. Важливо переконатися, що організація може зіткнутися з основними проблемами в управлінні електронними документами за допомогою хмарних обчислень, такими як прості або помилки підключення.

Поєднання механізму управління документами з цифровими бізнес-сервісами для задоволення зростаючих потреб призводить до більш складної динаміки, пов'язаної з розгортанням даних і ризиками безпеки даних. Загалом безпека даних включає безпеку системи, захист особистих даних, оптимізацію послуг, а також можливість ремонту. В контекст керування цифровими документами, природа цифрових документів, якими можна маніпулювати, або помилки, що виникають у формі змін або видалень навмисно чи ненавмисно, вказують на те, що захист документів не було виконано належним чином.

Методи захисту електронного документообігу для підтримки безпеки цифрових документів:

1) Обмеження доступу до цифрових документів для уповноваженого персоналу за для захисту цілісності документів і запобігання несанкціонованим змінам.

2) Створення системи безпеки мережі, такої як брандмауер, щоб захистити доступ сторонніх несанкціонованих осіб.

3) Встановлення програмного забезпечення фільтруючого шлюзу, щоб переконатися, що фільтр періодично оновлюється для захисту від спаму та шкідливого коду, наприклад вірусів.

4) Встановлення відповідних процедур системи резервного копіювання та аварійного відновлення для захисту цифрових документів.

5) Розробка журналу аудиту, щоб виявити, хто має доступ до системи, чи було дотримано визначених процедур безпеки, а також переконатися, що не сталося несанкціонованих дій або шахрайства.

Висновки. У роботі розкрито основи електронного документообігу при виконанні науково-дослідних робіт. Використання хмарних обчислень в управлінні електронними документами надає організаціям як переваги так і певні труднощі. Основними можливостями є підвищення ефективності управління електронними документами, особливо з точки зору централізованого зберігання документів, підвищення продуктивності та часу відгуку бізнес-процесів, а також високий рівень економічної ефективності. Хмарні обчислення дозволяють інтегрувати електронний документообіг в робочий процес організації, що дозволяє кожній з її підсистем співпрацювати та обмінюватися документами, не обмежуючись простором і часом.

Перспективами подальшого дослідження є розробка системи електронного документообігу із застосуванням хмарних технологій.

Список бібліографічного опису

1. Тукало С.М. Організаційно-педагогічні засади впровадження в наукових установах електронного документообігу на платформі SharePoint. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата педагогічних наук 13.00.10 – інформаційно-комунікаційні технології в освіті. 01 Освіта/педагогіка, Київ, 2021. 256 с.
2. Шимченко Л. Електронний документообіг як інноваційний механізм організації публічного адміністрування в умовах удосконалення децентралізації цих процесів // Електронний документообіг як інноваційний механізм організації публічного адміністрування в умовах удосконалення децентралізаційних процесів, 2021. № 12. С. 294-311.
3. Середа Х. В. Електронний документообіг наукових установ галузі освіти в контексті «Цифровізації» Інноваційна педагогіка, 2019. Т 2. №19. С. 176-179. DOI <https://doi.org/10.32843/2663-6085-2019-19-2-38>.
4. Обґрунтування рекомендацій щодо впровадження інформаційних систем в наукову та науково-технічну діяльність Міністерства Оборони України та Збройних Сил України [Електронний ресурс] / О. М. Перегуда, О. П. Черкес, П. М. Піонтківський, В. В. Гордійчук, А. В. Шишацький // Системи озброєння і військова техніка. 2020. № 1. С. 158-166. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2020_1_21

References

1. Justina Ikuomola, Oyekan Ezekiel, Orogbemi Olutomisin. A Secured Cloud-Based Electronic Document Management System. International Journal of Innovative Research and Development. 2022. DOI 10.24940/ijird/2022/v11/i12/DEC22010.
2. Han Jin, Wang Cheng, Miao Jie, Lu Mingxin, Wang Yingchun, Jin Shi. Research on Electronic Document Management System Based on Cloud Computing. Computers, Materials & Continua. 2021. № 66. P. 2645-2654. DOI 10.32604/cmc.2021.014371.
3. Atal Christina, Angala Mark, Fernandez Flordeliza, Lacsina Charvin. Electronic Document Flow Monitoring And Control System Using Document Structure Analysis. ECS Transactions. 2022. № 107. P. 20169-20192. DOI 10.1149/10701.20169ecst.
4. Shillaker Simon, Segarra Carlos, Mappoura Eleftheria, Fournial Mayeul, Vilanova Lluís, Pietzuch Peter. Faabric: Fine-Grained Distribution of Scientific Workloads in the Cloud. 2023. DOI 10.48550/arXiv.2302.11358.
5. Li Kun, Li Zhichun, Chen Yuetao, Wang Zixuan, Zhang Yiwei, Yuan Liang, Jia, Haipeng, Zhang, Yunquan, Cao Ting, Yang Mao. Gamify Stencil Dwarf on Cloud for Democratizing Scientific Computing. 2023.
6. Singh Divyanshu, Deepak Gerard. HybRDFSciRec: Hybridized Scientific Document Recommendation Framework. 2023. DOI 10.1007/978-3-031-27499-2_41.
7. Huang Qinlong, Wei Qinglin, Yan Guanyu, Zou Lin, Yang Yixian. Fast and Privacy-Preserving Attribute-Based Keyword Search in Cloud Document Services. IEEE Transactions on Services Computing. 2023. P. 1-13. DOI 10.1109/TSC.2023.3265270.
8. Muliantara Agus, ER Ngurah Agus Sanjaya, Widiarth I., Setiawan I Made Agus. Prototype of cloud based document management for scientific work validation. 2015. P. 237-240. DOI 10.1109/ICTS.2015.7379905.
9. Qəmbərli İlkin. An engineering document management system is a type of electronic DMS focused specifically on an organization's engineering drawings, documents, and data. 2022. № 08. P. 123-126. DOI 10.36719/2789-6919/08/123-126.
10. Mousse Mikaël. Electronic Document Securitisation based on Document Structure. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. 2022. № 11. P. 163-168. DOI 10.30534/ijatcse/2022/041142022.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-08>

УДК 004.94:656.02

Мельник Василь Михайлович, к. фіз.-мат.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0001-8282-6639>

Волинський фаховий коледж НУХТ

Багнюк Наталія Володимирівна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-7120-5455>

Бортник Катерина Яківна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0001-5282-099X>

Лінчук Олександр Миколайович, асистент

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

СИСТЕМА ДЛЯ ВЕДЕННЯ МОНІТОРИНГУ WEB-РЕСУРСУ ЗАСОБАМИ ELASTICSEARCH

Мельник В.М., Багнюк Н.В., Бортник К.Я., Лінчук О.М. Система для ведення моніторингу web-ресурсу засобами Elasticsearch. У роботі скомпоновано інтегровану систему для виконання моніторингу web-ресурсу засобом Elasticsearch. З'ясовано основні вимоги, наведено інтерфейс та необхідні ресурси для створення інтегрованої системи моніторингу, включаючи виконання інсталяції, налаштування та перевірки роботи. В систему включені основні програмні засоби, такі як Elasticsearch, Kibana, Logstash та Beats, які працюють з підтримки операційної системи Linux Ubuntu. В цілому, створена система досить добре відслідковує інциденти та виконує необхідний моніторинг.

Ключові слова: Elastic Search, веб-ресурс, безпека функціонування, вразливість, моніторинг.

Melnyk V., Bahniuk N., Bortnyk K., Linchuk O. System for web-resource monitoring by means of Elasticsearch. The paper composes an integrated system for web-resource monitoring studies made by Elastic Search. There are clarified basic requirements, an interface and the necessary resources for the integrated monitoring system creation, including installation, configuration and verification in work, are provided. The system includes basic software tools such as ElasticSearch, Kibana, Logstash and Beats, which are supported by Linux Ubuntu operating system. In general, the established system monitors incidents quite well and performs the necessary monitoring.

Keywords: Elastic Search, web resource, operational security, vulnerability, monitoring.

Вступ

Зі швидким розвитком інформаційних технологій, рівнем життя та комфортності, комп'ютерні системи та мережі стали вагомо впливати майже на всі сфери людської діяльності. Інформація перетворилася в товар, яким цілком можливо обмінюватися, придбати чи продати. В деяких випадках вартість інформації нерідко в багато разів перевершує вартість самих комп'ютерних систем, які її зберігають чи передають.

Однак, сучасні методи обробки, зберігання та передачі інформації досить вразливі до загроз, пов'язаних з її втратою, спотворенням чи розсекреченням. Тому недостатня захищеність та широке поширення таких систем в експлуатацію обумовлюють інтерес потенційних правопорушників, прояві їх нападів та зацікавленості пошуку їх вразливих сторін з метою заволодіння інформацією та її подальшого використання в корисних власних цілях. Час реагування на інцидент є надзвичайно важливим показником. Так як після будь-якої атаки власник веб-ресурсу несе різноманітні втрати, то чим довше вирішується інцидент, тим більше збитків може бути завдано. Внаслідок вище сказаного актуальним завданням є активізація вчасного реагування на інцидент та скорочення протікання його часу, яке починається з застосування відповідних підходів та засобів моніторингу з метою запобігання зловмисних дій та забезпечення безпечної роботи веб-ресурсу в мережевому оточенні.

Огляд SIEM-системи

До складу SIEM-системи входять SIM (Security Information Management) [1,11], який забезпечує аналіз, зберігання та звітність за даними накопичення та SEM (Security Event Management), що забезпечує керування безпекою, кореляцією подій, моніторингом в реальному часі, сповіщеннями та відображенням на кінцевих пристроях. SIEM-технологія забезпечує аналіз подій безпеки, отриманих від додатків і мережевих пристроїв. SIEM репрезентується додатками, послугами чи приладами і застосовується для журналювання даних і ведення звітів у сумісності з бізнес-даними. Дана система здатна відстежувати аномальну поведінку IT-систем і користувачів та своєчасно попереджувати про це співробітників за профілем.

Використання SIEM-системи може мати місце в таких випадках:

- для виявлення вразливості нульового дня та поліморфних вірусів, так як антивірусні додатки не володіють достатнім рівнем показників для виявлення цього типу шкідливих програм;

- для виконання втоматичного синтаксичного аналізу, нормалізації та класифікації журналів, незалежно від типу комп'ютера чи мережевого пристрою, які можуть журналювати події через пристрої;
- для візуалізації з використанням подій безпеки та журналу збоїв з метою допомоги у виявленні шаблонів;
- для формування протоколу відхилень зі вказівкою на неправильну конфігурацію або проблему безпеки, яку може бути виявлено під час розпізнання шаблонів, використання сповіщень та інформаційних панелей;
- SIEM має змогу виявляти шкідливі секретні повідомлення та викривати зашифровані канали;
- за допомогою SIEM з відповідною точністю може бути виявлена кібератака з можливістю визначити нападника та жертву.

В [11] наведено типи сповіщень на відповідні події, на які може бути налаштована діюча SIEM-система.

Аналіз програмних пакетів для організації системи

Одним з найкращих варіантів для реалізації SIEM-системи може використовуватися ELK-стек, який може поєднувати в собі три OpenSource-проекти: Elasticsearch, Logstash і Kibana [2-5]. ELK-стек є досить доступним, поширюється безкоштовно, хоча існують і платні функції, не обов'язкові для налаштування основної моніторингової системи.

Elasticsearch – це додаток з відкритим програмним кодом мови програмування Java, призначений для реалізації повнотекстового пошукового механізму та аналізу і базується на пошуковій системі Apache Lucene [2]. Він є головним елементом ELK Stack. Його особливістю є централізоване зберігання даних, необхідних для полегшення пошуку та перевірки різних аномалій чи невідповідностей. В Elasticsearch реалізовано механізм виконання та поєднання різних видів пошуку, наприклад, пошук за IP-адресою та отриманим повідомленням [3]. До недоліків його реалізації можна віднести високі апаратні вимоги, як правило, до оперативної пам'яті.

Logstash – це механізм обробки журнальних даних на стороні сервера, що виконує приймання їх з різних джерел [4] і реалізований засобами мови програмування Java. Він за певним шаблоном чи шаблонами виконує синтаксичний аналіз вхідних даних і розбиває їх на багато полів у відповідності до попередніх налаштувань та надсилає оброблені вже дані до Elasticsearch. Вхідні дані приходять зазвичай з різних пристроїв та систем, тобто, у різних форматах, а Logstash приводить їх до єдиного вигляду з метою полегшення роботи з ними в подальшому. Організація отримання даних з різних джерел для Logstash [10] реалізується через багаточисленні плагіни, які дозволяють фільтрувати та формувати їх. У нього більш високі вимоги до оперативної пам'яті, ніж у Elasticsearch, а тому його розгортання рекомендується на окремі фізичні машини.

Kibana – це прикладна графічна платформа для побудови графіків та діаграм, реалізована на мові JavaScript і призначена для пошуку та перегляду даних, що проіндексовані та збережені в базі Elasticsearch [3,5]. Вона володіє простим та інтуїтивно-зрозумілим інтерфейсом для роботи в браузері.

Beats – це додатки, призначені для збирання даних і відправки їх в Elasticsearch або Logstash [6,10], не вибагливі до ресурсів і не впливають на роботу пристрою встановлення. Однак, деякі некоректно налаштовані можуть накладати значні навантаження на систему, що може призвести до невиконання нею своїх функцій [8].

Filebeat – призначений для читування логів (рис. 1) [12]. Він стартує один чи кілька input-входів для перегляду місць, вказаних для журналу даних. Для кожного з журналів, який Filebeat знаходить, запускає файл, який виконує читування по одному з них для нового вмісту та надсилання нових його даних до Libbeat. Libbeat агрегує події та пересилає агреговані дані на вихід, налаштований для Filebeat, і запам'ятовує рядок зупинки. Це дозволяє відновити його роботу на випадок появи помилки і запобігає відправленню повторних повідомлень.

Пакет Metricbeat призначений для періодичного збору необхідних показників з операційної системи та серверних служб [13]. Він збирає метрики та статистичні дані і доставляє їх до вихідних йому вказаних даних, таких як Logstash або Elasticsearch [10]. Також він допомагає в здійсненні контролю серверів, збираючи показники із систем та серверних служб, таких як: NTP, Apache, MySQL, PostgreSQL, Nginx, MongoDB, Redis, System та Zookeeper.

Програма Auditbeat призначена для аудиту діяльності процесів та користувачів у робочих системах [16]. Її можна використовувати для збору та централізації подій аудиту з Linux Audit Framework чи Auditbeat для виявлення змін у таких важливих файлах, як двійкові та конфігураційні

файли, а також для виявлення потенційних порушень політики безпеки. Дана програма досить сильно навантажує систему під час відслідковування великої кількості файлів.

Packetbeat відіграє роль аналізатора мережеских пакетів в реальному часі, використовується в поєднанні з Elasticsearch для забезпечення системи моніторингу програм та аналізу їх продуктивності [15]. Він завершує Beats-платформу, забезпечуючи міжсерверну видимість в мережі. Даний пакет працює на базі захоплення мережевого трафіку між серверами, виконуючи декодування протоколів HTTP, MySQL, Redis та інших, розташованих на рівні додатків, співвідносячи запити з відповідями та фіксуючи цікаві поля для кожної з транзакцій. Він може допомогти легко виявити проблеми з внутрішньою програмою, такі як помилки чи проблеми в продуктивності, та виконує їх усунення набагато швидше.

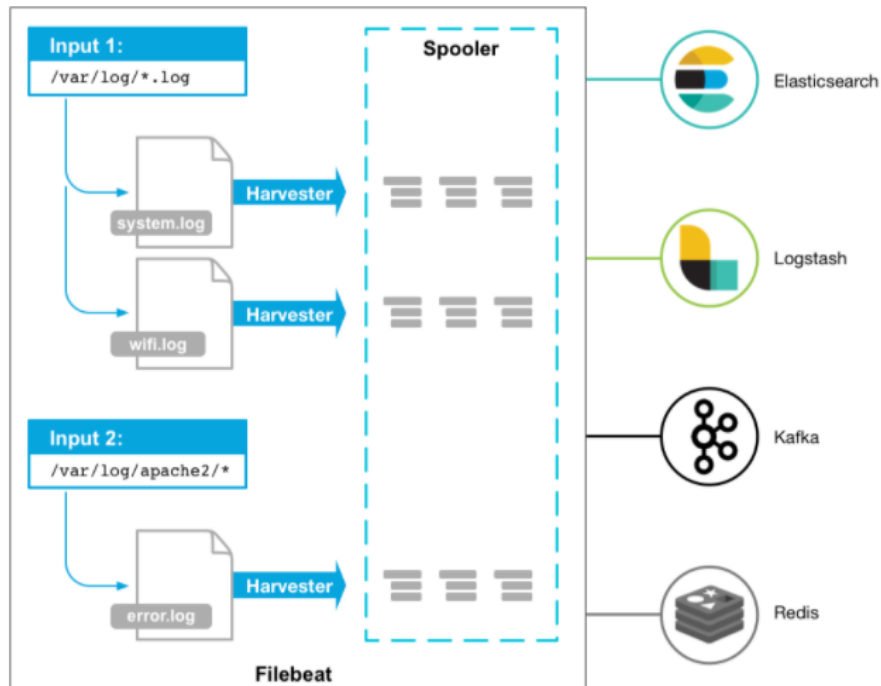


Рис.1 – Схема роботи Filebeat

Програма Packetbeat перевіряє міжсерверний трафік, аналізує протоколи на рівні прикладних програм і співвідносить повідомлення з транзакціями. Дана програма підтримує наступні мережеві протоколи: ICMP (v4 and v6), DHCP (v4), DNS, HTTP, AMQP 0.9.1, Cassandra, MySQL, PostgreSQL, Redis, Thrift-RPC, MongoDB, Memcache, NFS, TLS та SIP/SDP (beta). Packetbeat може надсилати відповідні транзакції безпосередньо в Logstash або Elasticsearch та працювати на тих же серверах, що й процеси додатків, чи на власних серверах [8,10]. В ході роботи на визначених серверах Packetbeat може отримувати трафік від прослуховуючих дзеркальних портів комутатора або від пристроїв. В процесі такого розгортання на моніторинговій програмі відсутня затримка.

Пакет Winlogbeat призначений для зчитування Windows-логів з одного чи кількох журналів подій за допомогою API, веде фільтрування події на основі критеріїв, налаштованих користувачем, і надсилає дані про події на Elasticsearch або Logstash через налаштовані виходи [10,14]. Winlogbeat веде спостереження за журналами подій з метою своєчасного надсилання нових даних про події. Позиція зчитування для кожного журналу подій зберігається на диску, щоб Winlogbeat міг легко відновити роботу після рестарту. Даний пакет може збирати дані про події з будь-яких журналів подій працюючої системи, наприклад, фіксувати такі як: події додатків, апаратні події, події безпеки та системні події.

Програма Heartbeat також входить в систему моніторингу і встановлюється на віддаленому сервері з метою періодичної перевірки статусу сервісів і визначення їх доступності [17]. На відміну від Metricbeat, який повідомляє про ефективність роботи серверів, Heartbeat визначає і повідомляє про доступність сервісів. Дана програма корисна для підтвердження виконання сервером свого необхідного рівня обслуговування на випадок безвідмовної роботи, що є також корисним для інших сценаріїв, таких як випадки використання безпеки, де необхідно переконатися в неможливості отримання доступу до послуг ззовні на приватному корпоративному сервері. Можна також

© Мельник В.М., Багнюк Н.В., Бортник К.Я, Лінчук О.М.

налаштувати Heartbeat на перевірку всіх DNS IP-адреси для визначеного імені хоста. Таким чином, можна перевірити всі служби, збалансовані за навантаженням, на їх доступність. В ході виконання налаштування Heartbeat вказуються монітори, що визначають імена хостів для здійснення перевірки, кожен з яких працює на базі йому вказаного розкладу. Наприклад, можна налаштувати один монітор на кожні 10 хвилин запуску, а інший – для роботи з 10:00 до 17:30. Дана програма підтримує монітори для перевірки хостів за допомогою:

- ICMP (v4 та v6) Echo Requests – для перевірки на доступність послуги використовують монітор icmp, який вимагає кореневого доступу.
- TCP – для підключення через TCP використовується tcp-монітор, який можливо додатково налаштувати для контролю кінцевої точки, надіславши та/або отримавши корисне спеціальне навантаження.
- HTTP – використовується для підключення монітор http, який можливо додатково налаштувати для перевірки повернення службою очікуваної відповіді, наприклад, коду стану, заголовка відповіді чи вмісту.

Монітори tcp і http надають підтримку для SSL/TLS та деяких налаштувань проксі.

Вимоги до SIEM-системи

SIEM-система, в основному, повинна володіти такою функціональністю:

- Функціями агрегації даних, управлінням журналами даних, збором даних з різних джерел: мереж, пристроїв та сервісів, датчиків систем безпеки, серверів, баз даних, програм із забезпеченням консолідації даних для пошуку критичних подій.
- Функції кореляції, які реалізують пошук спільних атрибутів чи зв'язування подій у кластери. Така технологія включає застосування технічних заходів для інтеграції даних з різних джерел з метою формування вихідних даних як значущої інформації. Кореляція даних представляє типові функції з підмножини Security Event Management [11].
- Функції сповіщення, які включають автоматизований аналіз подій кореляції та генерацію повідомлень про виявлені проблеми. Оповіщення можуть виводитися на панель додатка, чи направлятися в інші канали оповіщення: GSM-шлюз, e-mail чи інші.
- Функції відображення або інформаційні панелі, реалізуючі відображення діаграм для ідентифікації патернів, відмінних від стандартно прийнятої поведінки.
- Функції сумісності або трансформування, які реалізуються через спеціальні додатки, призначені для автоматичного збору даних, адаптації агрегованих даних до діючих процесів управління інформаційною безпекою, формування звітності та ведення аудиту.
- Функції збереження даних, до яких входять: довготривале зберігання даних в хронологічному часовому порядку з метою їх кореляції та забезпечення трансформування. Довготривале зберігання даних є необхідним для проведення комп'ютерно-технічних експертиз, так як розслідування мережевого інциденту все-таки відбувається з затримкою в часі з моменту його здійснення.
- Функції експертного аналізу, які забезпечують можливість пошуку по журналах, розміщених на різних вузлах і можуть приводитися до виконання в рамках програмно-технічної експертизи.

Функціонально-структурна схема роботи системи

Для організації роботи ELK-стеку встановлюються параметри Beats на цільових машинах, які направляють дані в Logstash [6] (рис. 2). Останній, в свою чергу, обробляє дані і передає їх в Elasticsearch. Logstash повинен бути встановлений на окремій машині, так як він і Elasticsearch потребують відповідних системних ресурсів.

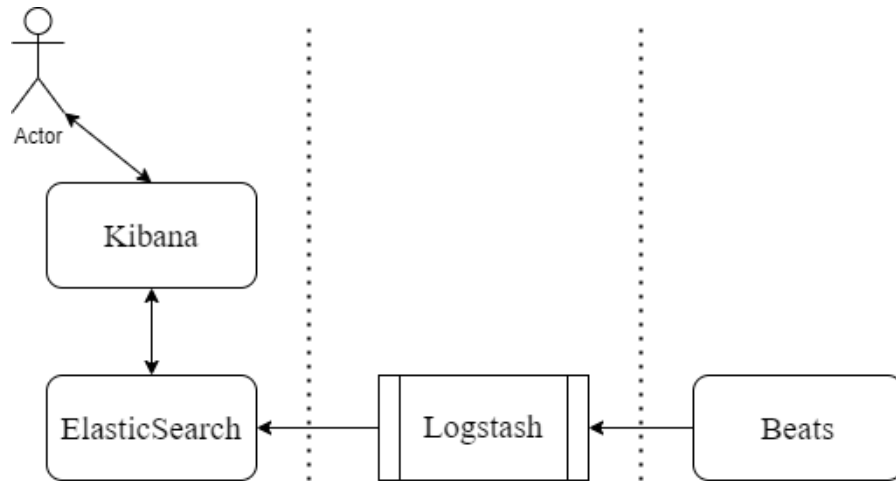


Рис. 2 – Структурна схема ELK-стеку

Elasticsearch отримує і зберігає дані та виконує їх пошук. Для отримання доступу до бази даних користувач, використовуючи Kibana, надсилає запити Elasticsearch та візуалізує отриманні дані [5]. Також в Kibana знаходяться інструменти керування різними аспектами ELK-стеку.

Мета і завдання роботи

З метою проведення дослідження моніторингу необхідно створити та скомпонувати описану базову систему, включивши в неї необхідні ресурси та засоби, згадані в попередніх розділах, з їх функціями та налаштуваннями в інтегровану автоматизовану систему реагування на інциденти та їх моніторингу.

Реалізація інтегрованої системи повинна бути здійснена на основі програмного засобу Elasticsearch із включенням всіх задіяних компонентів. Результатом є перевірка її працездатності та журналювання подій безпеки. В цілому, система повинна виконати моніторинг вибраного для дослідження веб-ресурсу і забезпечити якісну роботу спеціалістів під час її застосування.

Реалізація та налаштування системи моніторингу

Для моніторингу веб-ресурсу за допомогою даної системи необхідно спочатку виконати розгортання ELK-стеку. З цією метою використано операційну систему Linux Ubuntu з необхідними root-правами для виконання більшості необхідних для проведення моніторингу команд. Необхідністю є права суперкористувача в UNIX-подібних системах без накладання будь-яких обмежень на виконання команд.

Реалізація інтегрованої системи моніторингу виконувалася на одній фізичній машині, на якій у файлах конфігурації усі IP-адреси були встановлені нами на 127.0.0.1 чи localhost. Проте в подібних корпоративних системах встановлювати IP-адреси потрібно тільки на тих машинах, на яких встановлені необхідні для виконання даного моніторингу програмні продукти.

Формування системи почнемо зі встановлення пакета apt-transport-https, використавши команду, подану нижче:

```
sudo apt-get install apt-transport-https.
```

Для встановлення ELK-стеку необхідно під'єднати репозиторій, застосувавши команду, представлену нижче:

```
echo "deb https://artifacts.elastic.co/packages/7.x/apt stable main" | sudo tee /etc/apt/sources.list.d/elastic-7.x.list.
```

Наступним кроком слід встановити всі програмні продукти, необхідні для функціонування ELK-стеку. Спочатку встановимо Elasticsearch, застосувавши команду:

```
sudo apt-get update && sudo apt-get install elasticsearch.
```

Далі встановлюємо програмний продукт Logstash [10], виконавши команду:

```
sudo apt-get update && sudo apt-get install logstash.
```

Наступним кроком повинен бути встановлений програмний продукт Kibana [5] командою:

```
sudo apt-get update && sudo apt-get install kibana.
```

Після встановлення Kibana необхідно встановити продукт Filebeat [12], застосувавши команди:

```
curl -L -O https://artifacts.elastic.co/downloads/
beats/filebeat/filebeat-7.13.0-amd64.deb;
```

та

```
sudo dpkg -i filebeat-7.13.0-amd64.deb.
```

Далі необхідно виконати процедуру налаштування до роботи всіх задіяних до даного моніторингу програмних продуктів. Для роботи Elasticsearch важливим є налаштування Java-машини з урахуванням виділення оперативної пам'яті в достатній для неї мірі. У разі, якщо кількість виділеної пам'яті для Elasticsearch буде не достатньою, то він буде сповільнювати виконання своїх функцій, або взагалі може припинити свою роботу, констатувавши помилку збою. Рекомендовано в цьому випадку йому надавати хоча б $\frac{1}{4}$ частину доступної пам'яті, і не менше 1 Гбайта – в окремих випадках навантаження. В наведеному нами дослідженні для Elasticsearch було надано 4 Гбайти оперативної пам'яті, а для його роботи – 1,28 Гбайт.

Файл конфігурації за замовчуванням знаходиться в директорії [9]:

```
/etc/elasticsearch/jvm.options.  
##  
-Xms1280m  
-Xmx1380m  
##.
```

Далі виконаємо налаштування програмного засобу Logstash [6]. За замовчуванням шлях до його файлу конфігурації знаходиться в директорії:

```
/etc/logstash/jvm.options.
```

Заодно одразу налаштуємо pipeline для Logstash [10], який відіграє роль спеціального "конвейера", задіяний для обробки вхідних даних. Слід відмітити, що таких конвейерів може бути кілька, кожен з яких може налаштовуватися для підтримки виконання різних задач. Для них необхідно виконати налаштування їх входу та виходу і, за потреби, – фільтрів.

```
- pipeline.id: main  
input{  
  beats {  
    port => 5044  
  }  
}  
output {  
  elasticsearch{  
    hosts => ["http://localhost:9200"]  
    index      => "%{[@metadata][beat]}-%  
%{[@metadata][version]}"  
  }  
}.  
}
```

В даному випадку, як це видно з наведених команд, Elasticsearch виконуватиме прослуховування порту за номером 9200, а тому вивід програмного засобу Logstash слід налаштовувати на даний порт.

Для засобу Filebeat необхідно вказати шлях до файлів з метою виконання ним перевірки та виводу даних. Наведемо результат налаштування засобу Filebeat [11,12] нижче:

```
- type: filestream  
# Change to true to enable  
  enabled: false  
# Path that should be  
  paths:  
- /var/log/*.log.
```

Представимо також налаштування виводу даних для засобу Filebeat [12]

```
output.logstash:  
# The Logstash hosts  
hosts: ["localhost:5044"].
```

Під час налаштування програмного продукту Kibana необхідно вказати адресу і номер порта сервера та надати доступ до програми Elasticsearch [5] (рис. 3).

```
server.port: 5601

# Specifies the address to which the Kibana server should listen for HTTP requests
# The default is 'localhost', which usually means you are running Kibana on your local
# To allow connections from remote users, set this to a different value.
server.host: "127.0.0.1"

elasticsearch.hosts: ["http://127.0.0.1:9200"]
```

Рис. 3 – Результат налаштування засобу Kibana

Завершивши налаштування всіх програмних засобів, задіяних в моніторингу, необхідно виконати їх запуск. Для цього виконується ряд команд, наведених нижче:

```
sudo systemctl start elasticsearch;
sudo systemctl start logstash;
sudo systemctl start kibana;
sudo systemctl start filebeat.
```

Для перевірки робочого статусу всіх запущених на виконання програм, необхідно застосувати команду, наведену нижче, результат виконання якої для ElasticSearch наведений на рис. 4.

```
systemctl status elasticsearch.
```

```
kolya@kolya-VirtualBox:~$ systemctl status elasticsearch
● elasticsearch.service - Elasticsearch
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/elasticsearch.service; enabled; vendor preset: enabled)
   Active: active (running) since Wed 2021-06-02 08:51:34 EEST; 3h 21min ago
     Docs: https://www.elastic.co
    Main PID: 669 (java)
      Tasks: 61 (limit: 2315)
     Memory: 658.7M
    CGroup: /system.slice/elasticsearch.service
            └─ 669 /usr/share/elasticsearch/jdk/bin/java -Xshare:auto -Des.networkaddress.cache.ttl=60 -Des.networkaddress.cache.negative.ttl=10 -XX:
               1317 /usr/share/elasticsearch/modules/x-pack-ml/platform/linux-x86_64/bin/controller
```

Рис. 4 – Результат перевірки робочого статусу програми ElasticSearch

І, на завершення, потрібно запам'ятати, що для зупинки роботи всіх задіяних в даному моніторингу засобів слід виконати команду, наведену нижче:

```
sudo systemctl stop elasticsearch.
```

Обговорення системи проведення моніторингу web-ресурсу засобами ElasticSearch

Першим кроком прослідкуємо виконання програми Kibana, яка входить в систему моніторингу web-ресурсу, доступ до якої надається згідно наведених вище параметрів налаштувань. В даному випадку – дослідження localhost буде приймати значення 5601. Сюди входять також і програмні продукти Dashboard, Discover, Canvas і Maps (рис. 5).

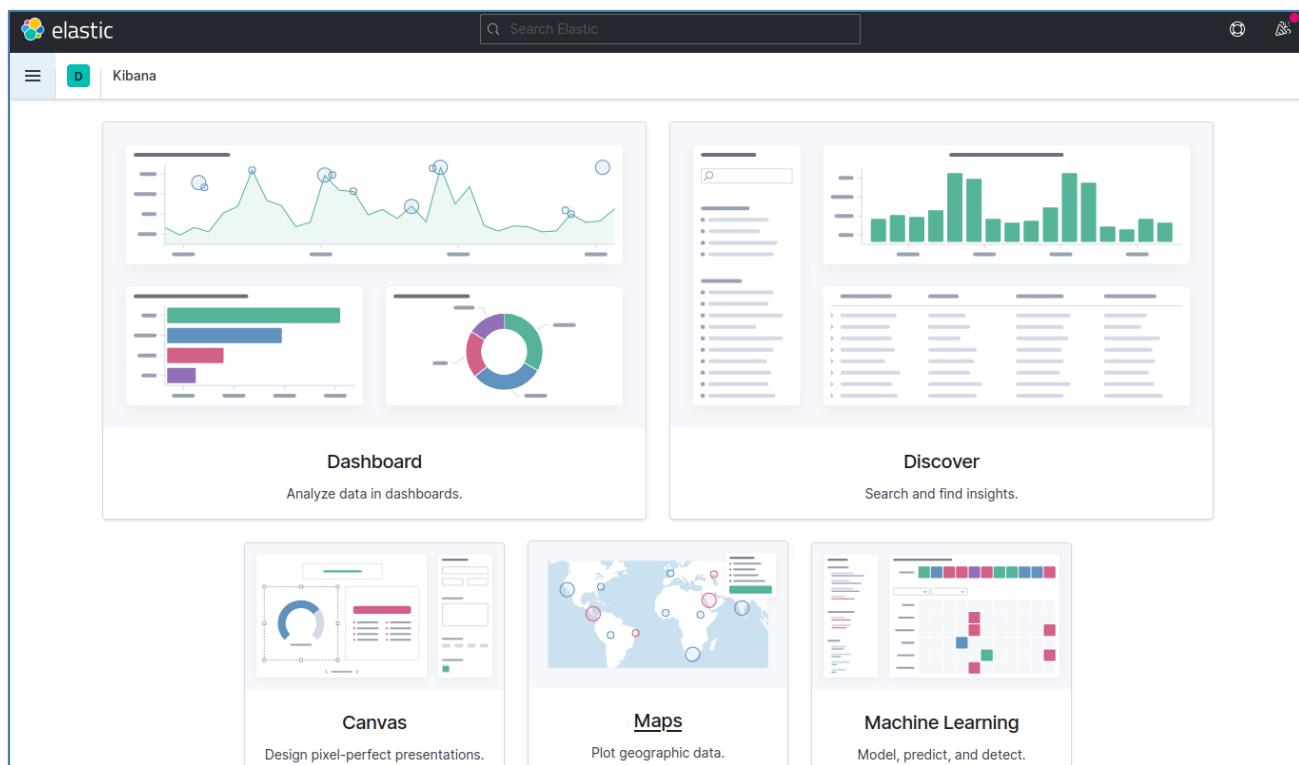


Рис. 5 – Вигляд робочого нтерфейсу програми Kibana

Наступним кроком виконаємо опис зазначених вище програмних інструментів. Почнемо першим описувати програмний інструмент Discover, який здійснює перегляд даних, а вигляд його робочого вікна наведений на рисунку 6.

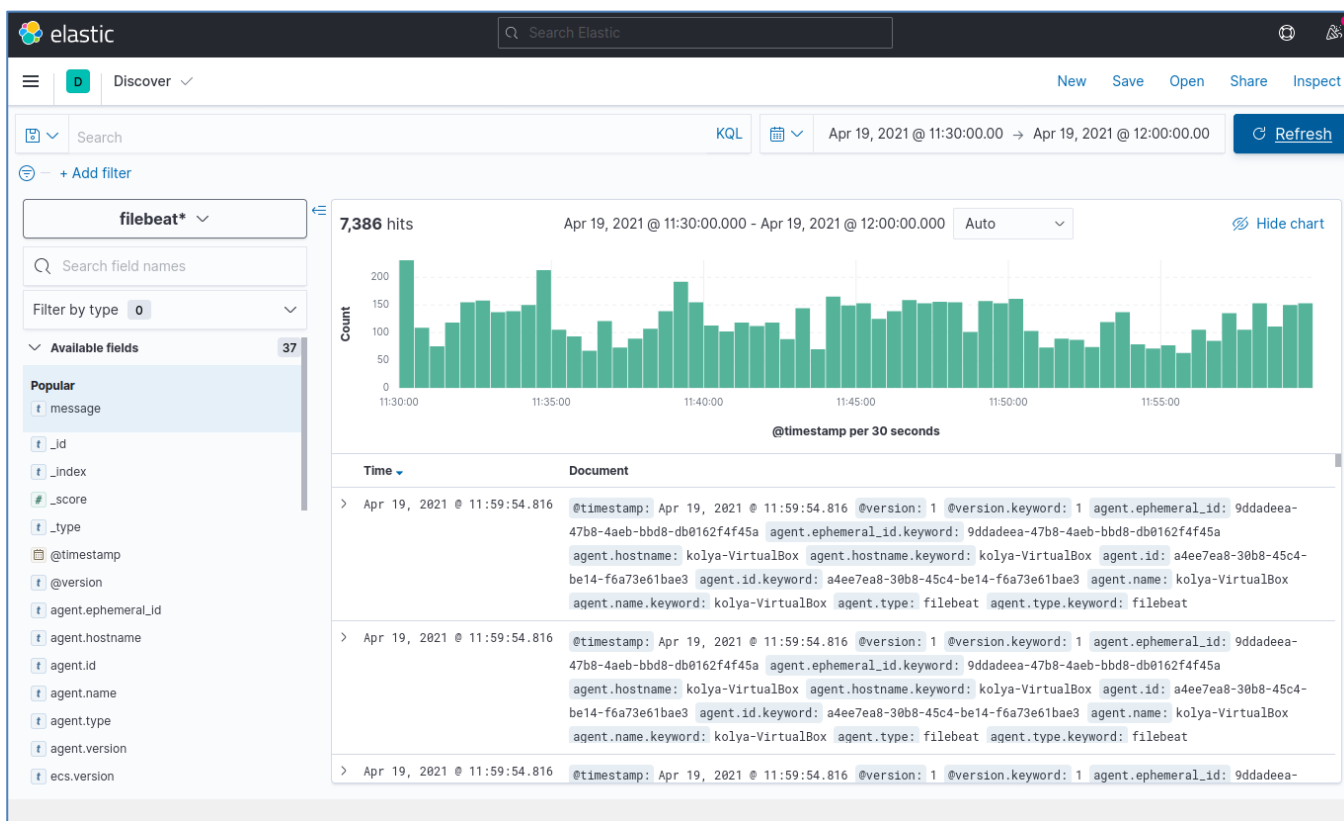


Рис. 6 – Вигляд робочого вікна програми Discover

Як видно з наведеного рисунку, на передньому плані Discover містить гістограму, призначену для виконання пошуку даних за відповідними атрибутами, такими як час їх створення та кількістю

© Мельник В.М., Багнюк Н.В., Бортник К.Я, Лінчук О.М.

прийнятих за визначений період часу повідомлень. Також з рисунка видно, що на гістограмі можуть бути помітними і аномалії відтворення (рис. 7).

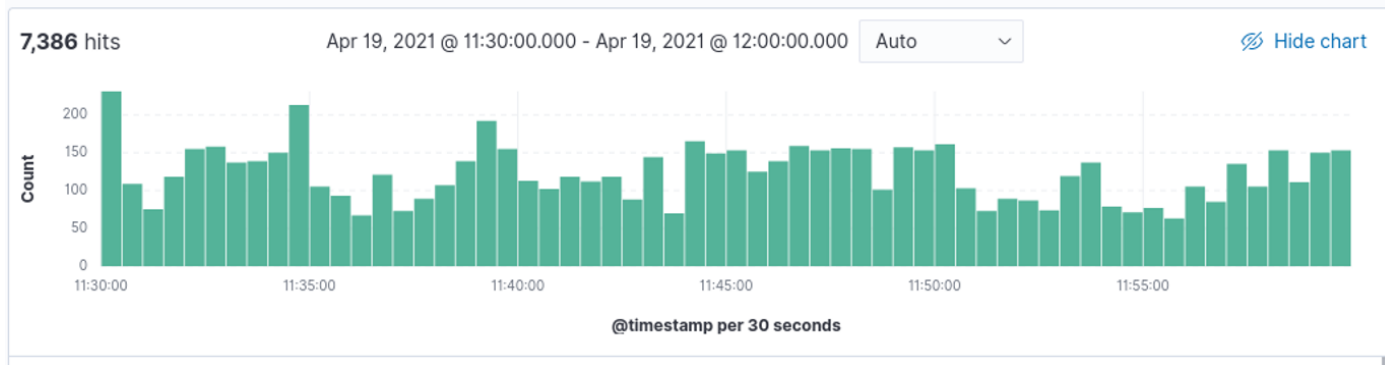


Рис. 7 – Гісторама для пошуку даних у робочому вікні програми Discover

Справа вертикально розміщені поля, за якими реалізується можливість виконувати відповідну вибірку даних. Сукупність полів та їх значень наведено на рис. 8.

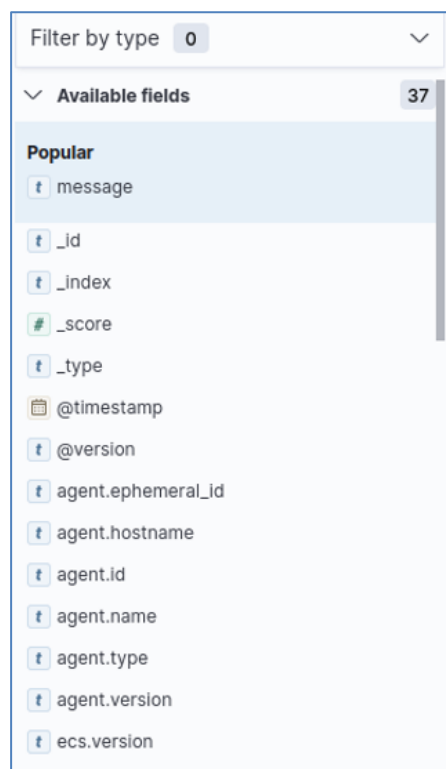


Рис. 8 – Вигляд полів програми Discover для пошуку даних

Для прикладу наведемо також перелік отриманих даних, які відображаються в зоні робочого вікна Discover нижче гістограми (рис. 9) і відповідають зазначеному часовому проміжку моніторингу під час виконання дослідження із відповідно налаштованим фільтруванням даних.

Time	Document
> Apr 19, 2021 @ 11:59:54.816	<pre> @timestamp: Apr 19, 2021 @ 11:59:54.816 @version: 1 @version.keyword: 1 agent.ephemeral_id: 9ddadeea-47b8-4aeb-bbd8-db0162f4f45a agent.ephemeral_id.keyword: 9ddadeea-47b8-4aeb-bbd8-db0162f4f45a agent.hostname: kolya-VirtualBox agent.hostname.keyword: kolya-VirtualBox agent.id: a4ee7ea8-30b8-45c4-be14-f6a73e61bae3 agent.id.keyword: a4ee7ea8-30b8-45c4-be14-f6a73e61bae3 agent.name: kolya-VirtualBox agent.name.keyword: kolya-VirtualBox agent.type: filebeat agent.type.keyword: filebeat </pre>
> Apr 19, 2021 @ 11:59:54.816	<pre> @timestamp: Apr 19, 2021 @ 11:59:54.816 @version: 1 @version.keyword: 1 agent.ephemeral_id: 9ddadeea-47b8-4aeb-bbd8-db0162f4f45a agent.ephemeral_id.keyword: 9ddadeea-47b8-4aeb-bbd8-db0162f4f45a agent.hostname: kolya-VirtualBox agent.hostname.keyword: kolya-VirtualBox agent.id: a4ee7ea8-30b8-45c4-be14-f6a73e61bae3 agent.id.keyword: a4ee7ea8-30b8-45c4-be14-f6a73e61bae3 agent.name: kolya-VirtualBox agent.name.keyword: kolya-VirtualBox agent.type: filebeat agent.type.keyword: filebeat </pre>
> Apr 19, 2021 @ 11:59:54.816	<pre> @timestamp: Apr 19, 2021 @ 11:59:54.816 @version: 1 @version.keyword: 1 agent.ephemeral_id: 9ddadeea-47b8-4aeb-bbd8-db0162f4f45a agent.ephemeral_id.keyword: 9ddadeea-47b8-4aeb-bbd8-db0162f4f45a agent.hostname: kolya-VirtualBox agent.hostname.keyword: kolya-VirtualBox agent.id: a4ee7ea8-30b8-45c4-be14-f6a73e61bae3 agent.id.keyword: a4ee7ea8-30b8-45c4-be14-f6a73e61bae3 agent.name: kolya-VirtualBox agent.name.keyword: kolya-VirtualBox agent.type: filebeat agent.type.keyword: filebeat </pre>

Рис. 9 – Представлення даних виконаного моніторингу в зазначений проміжок часу після фільтрування

Наступним є програмний інструмент Canvas, який призначений для візуалізації та презентації даних. Він здійснює вивантаження даних з програми моніторингу Elasticsearch та візуально поєднує їх з відповідно вибраними кольорами, зображеннями та текстом для створення динамічних мультисторінкових екранів перегляду.

Програма Canvas дозволяє також виконувати і інші операції, необхідні для проведення моніторингу, такі як створення робочого простору та його персоналізації, налаштування робочої панелі з використанням власних графічних відображень рисунків та тексту, вивантаження необхідних даних з Elasticsearch та виведення їх діаграмою, графіком чи текстовим моніторингом, фокусування отриманих та, відповідно, відфільтрованих даних з метою відображення та інші.

Програмний інструмент Dashboard надає можливість виводити інформацію у вигляді діаграм, гістограм, графіків та інших форм наочного представлення даних (рис. 10,11). Використовуючи Dashboard, можна здійснювати перетворення даних з одного або/чи кількох робочих шаблонів індексів на відповідний набір панелей, які надають можливість оптимізувати дані, а під час виконання аналізу зосередитися тільки на важливих із них.

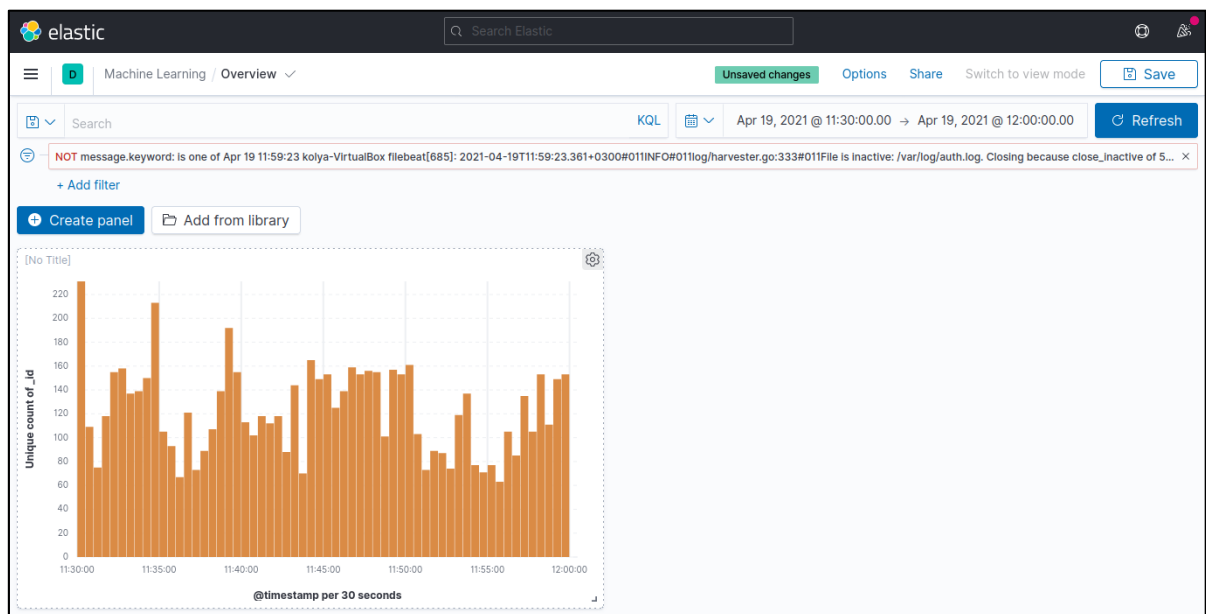


Рис. 10 – Наведена гістограма з підтримки відображення Dashboard

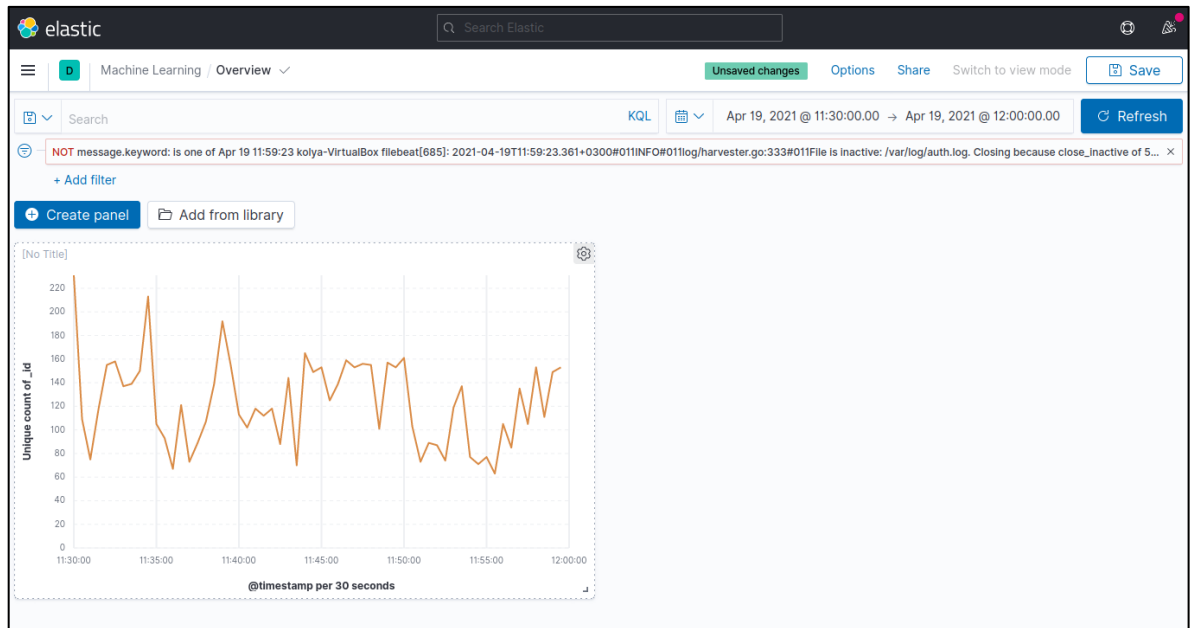


Рис. 11 – Приклад графіки з підтримки відображення Dashboard

Програмний інструмент Maps, що широко використовується в мобільних додатках [18], дає можливість відображати геодані, призначені для різного роду запитів. Для такого відображення треба інсталиювати плагін Geoip для Logstash [19], за допомогою якого можна трансформувати IP-адреси в геодані, використовуючи відкриту базу даних. Ліцензоване машинне навчання дозволяє обробляти дані, отримані за допомогою нейронних мереж, які в даному випадку є потужним інструментом для знаходження аномалій в непомітних для програми чи людини місцях. Заодно, в інтерфейсі програмного засобу Kibana знаходиться Stack Management для управління такими параметрами-індексами, як ліцензія, параметризація, управління кластерними об'єднаннями, шаблонами індексації та інтерфейсом користувача.

Програмний засіб Alerting дає можливість сформулювати основні положення та характеристики складних умов для їх виявлення у задіяних Kibana-додатках та застосовувати дії їх виконання. Використовуючи інтерфейс управління, засіб Alerting здатний централізовано керувати такими діями. До того ж, він надає набір сполучних ліній та правил стеку для використання і працює, активізуючи перевірки за встановленим розкладом та відповідним правилом, визначаючи їх реальні умови прояву. Якщо в ході перевірки намічена умова виконана, то правило висуває до виконання одну або/чи кілька пов'язаних дій, які взаємодіють зі службами Kibana, по можливості задіяючи сторонні інтегровані засоби.

З метою перевірки конкретних визначених умов кожне правило – це виконання на Kibana-сервері конкретного завдання в фоновому режимі, в склад якого входять три складові: умови виявлення, частота активізації перевірок та відповідні дії під час підтвердження прояву виконання зазначених умов. Для прикладу можна взяти моніторинг серверів, під час якого визначене правило має можливість перевіряти використання процесора на середнє значення, більше 0,9 на кожному, протягом визначеного інтервалу часу – останніх двох хвилин (рис. 12). Все це становить певну умову перевірки, яка стартує на виконання кожну хвилину (відповідно до розкладу), надсилаючи повідомлення у вигляді попереджень за темою "дія" через SMTP електронною поштою.

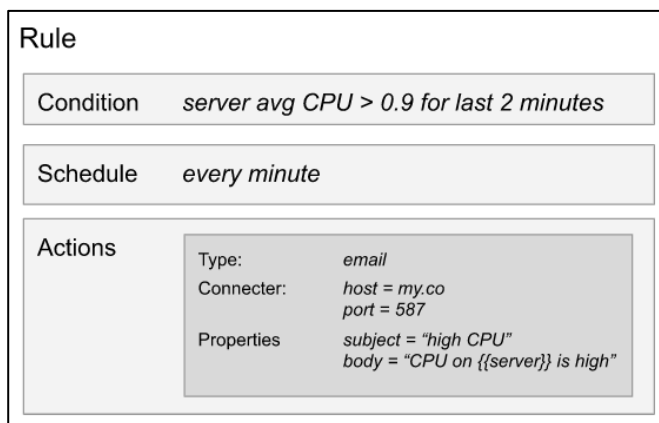


Рис. 12 – Приклад повідомлення попередження з правилом відслідковування

Правила Kibana становлять конкретні умови для запуску відповідної JavaScript-функції на Kibana-сервері. Така організація дій надає відповідної гнучкості для підтримки та перевірки широкого діапазону умов: від найпростішого – реалізації Elasticsearch-запиту, до складного – виконання громіздких обчислень над даними, що надходять з одного чи декількох джерел, якими можуть бути і зовнішні системи.

Розклади встановлених правил Kibana становлять визначені часові проміжки між активними перевітками, що можуть змінюватися від кількох секунд до кількох місяців. Дії виконання в межах правила втілюють виклики взаємодії з Kibana-сервісами або/чи сторонніми інтегрованими системами. Як уже згадувалося, вони виконуються в фоновому режимі у вигляді завдання на сервері Kibana, якщо виконуються задані умови правил. Результат виконання становить шаблон, якому надаються всі необхідні параметри для виклику відповідної служби, за винятком тих, які є відомими під час перевірки виконання умови в момент діючого правила.

Для моніторингу сервера можна використовувати адресу діючої електронної пошти з тілом повідомлення за допомогою запису:

```
.email server CPU on {{server}} is high.
```

Якщо відповідно до правила виявляється виконання певної умови (стану), воно генерує сповіщення, що в собі містить відомості про умову, шаблон з наданими даними та іменем сервера, і виконує призначену дію чи їх послідовність на сервері Kibana.

Однак в ході перевірки стану одне і те ж правило може виявляти виконання умови в кількох екземплярах серверів (рис. 13). В цьому випадку середовище Kibana відстежує кожне зі згенерованих сповіщень окремо і для виконання кожного із них вживає конкретних заходів. Таким чином, використовуючи подібний моніторинг набору серверів, кожен із них, в якого середнє завантаження процесора перевищуватиме 0,9, буде відстежуватися зі сповіщенням. Для кожного із таких серверів буде надсилатися електронною поштою окреме повідомлення, яке сповістить перевищення встановленого граничного значення навантаження процесора.

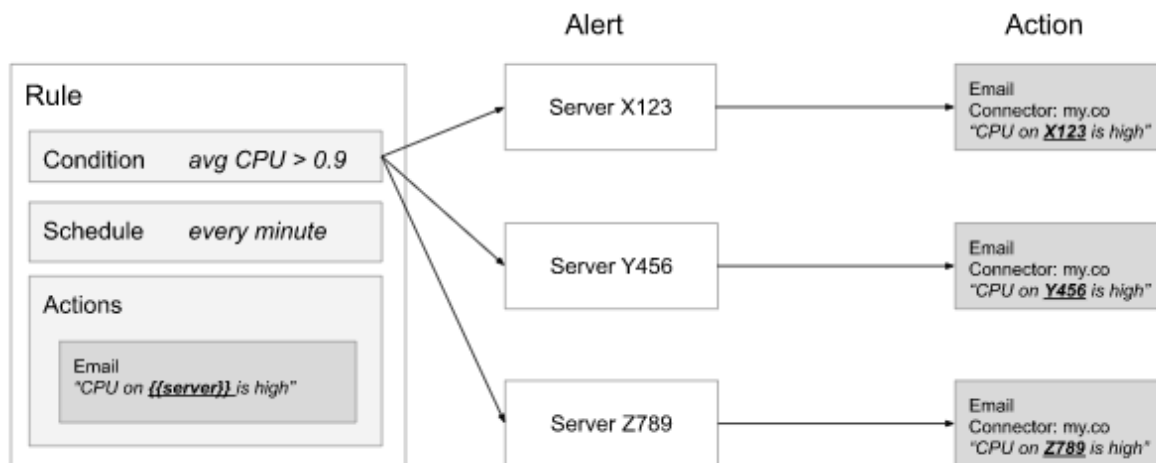


Рис. 13 – Виконання правила для кількох серверів

Висновки

Велика кількість web-ресурсів в Інтернет, їх безпечне функціонування та використання в наш час потребує реалізації досконалих підходів та технологій захисту для забезпечення їх надійності роботи. З метою запобігання вторгнень та зломів web-розробок успішно можуть бути використані SIEM-системи, які досить швидко реагують на інциденти. Важливим є і те, що сьогодні розробники SIEM-систем по різному вдосконалюють їх, в тому числі і в напрямку автоматизації. Подібні дослідження корисні і в тому сенсі, що в майбутньому подібні удосконалені системи можуть вести автоматичне відслідковування та моніторинг, швидко реагувати на прояви порушень безпеки ресурсів Інтернет будь-якого виду. Подібні системи можна удосконалювати за допомогою поєднання новітніх підходів моніторингу, параметризації та нейронних мереж.

Безпеку функціонування web-розробок в наш час підтримують і технології машинного навчання з залученням ELK-стеку. Також програмний засіб Elastic регулярно оновлюється, що спонукає до зростання надійності та зниження вірогідності компрометації наведеної системи, враховуючи і його безкоштовну версію, яка в деякій мірі задовільняє потреби контролю безпеки. Його платна версія є все-таки досить потужним інструментом. Сьогодні програмний засіб Elasticsearch є досить гнучкою та перспективною системою для проведення подальших досліджень з метою реалізації моніторингу веб-ресурсів, враховуючи показники зниження часу реагування на інциденти, простоти налаштування під задачі різного типу та мінімумом використання системних ресурсів.

Список використаних джерел

1. Огляд рішень Security Information and Event Management (SIEM). – 2020. – Електронний ресурс: Режим доступу: <https://habr.com/ru/company/roi4cio/blog/528770/>.
2. Installing the Elastic Stack. Upgrade to Elastic 8.6.2. – 2022. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.elastic.co/guide/en/elastic-stack/current/installing-elastic-stack.html>.
3. How To Install Elasticsearch, Logstash, and Kibana (Elastic Stack) on Ubuntu 22.04. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/how-to-install-elasticsearch-logstash-and-kibana-elastic-stack-on-ubuntu-22-04>.
4. Installing Logstash. Logstash Reference: Multiple Pipelines. – 2023. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.elastic.co/guide/en/logstash/current/installing-logstash.html>.
5. Elastic. Kibana – your window into Elastic. – 2023. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.elastic.co/guide/en/kibana/current/introduction.html>.
6. Setting Up and Running Logstash. Logstash.yml. – 2023. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.elastic.co/guide/en/logstash/current/logstash-settings-file.html>.
7. Configuring Logstash | Logstash Reference [7.17] – Elastic. Configuring Logstash. – 2023. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.elastic.co/guide/en/logstash/current/configuration.html>.
8. Multiple Pipelines. Logstash Reference [8.6] – Elastic. – 2023. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.elastic.co/guide/en/logstash/current/multiple-pipelines.html>.
9. Guide to the Most Important JVM Parameters. JVM.settings. – 2023. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.baeldung.com/jvm-parameters>.
10. Puttagunta C., Kulkarni A., Bannon S. et al. Elastic. Creating a Logstash pipeline. Structure of a Config File [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.elastic.co/guide/en/logstash/current/configuration-file-structure.html>.
11. Accessing Event Data and Fields in the Configuration [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.elastic.co/guide/en/logstash/current/event-dependent-configuration.html>.
12. Configuring Logash. Filebeat overview. – 2023. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.elastic.co/guide/en/beats/filebeat/current/filebeat-overview.html>.
13. Metricbeat Reference. Metricbeat overview [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.elastic.co/guide/en/beats/metricbeat/current/metricbeat-overview.html>.
14. Getting Started with Winlogbeat. Winlogbeat Overview [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.elastic.co/guide/en/beats/winlogbeat/current/winlogbeat-overview.html>.
15. Getting Started with Packetbeat. Packetbeat overview. – 2023. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.elastic.co/guide/en/beats/packetbeat/current/packetbeat-overview.html>.
16. Auditbeat Reference: Auditbeat overview. – 2023. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.elastic.co/guide/en/beats/auditbeat/current/auditbeat-overview.html>.
17. Heartbeat Reference. Heartbeat overview. – 2023. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.elastic.co/guide/en/beats/heartbeat/current/heartbeat-overview.html>.
18. MAPS.ME. – 2023. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://android.bibprog.org.ua/ua/maps-me/>.
19. Logstash Setup with GeoIP – Discuss the Elastic Stack. – 2023. – [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.elastic.co/guide/en/logstash/current/plugins-filters-geoip.html#description_134.

References

1. Overview of Security Information and Event Management (SIEM) solutions. – 2020. – Electronic resource: Access mode: <https://habr.com/ru/company/roi4cio/blog/528770/>.

2. Installing Elastic Stack. Upgrade to Elastic 8.6.2. – 2022. – [Electronic resource] – Access mode: <https://www.elastic.co/guide/en/elastic-stack/current/installing-elastic-stack.html>.
3. How to install Elasticsearch, Logstash and Kibana (Elastic Stack) on Ubuntu 22.04. [Electronic resource] - Access mode: <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/how-to-install-elasticsearch-logstash-and-kibana-elastic-stack-on-ubuntu-22-04>.
4. Installing Logstash. Logstash link: multiple pipelines. – 2023. – [Electronic resource] – Access mode: <https://www.elastic.co/guide/en/logstash/current/installing-logstash.html>.
5. Elastic. Kibana – your window into Elastic.– 2023. – [Electronic resource] – Access mode: <https://www.elastic.co/guide/en/kibana/current/introduction.html>.
6. Configuring and running Logstash. Logstash.yml. – 2023. – [Electronic resource] – Access mode: <https://www.elastic.co/guide/en/logstash/current/logstash-settings-file.html>.
7. Configuring Logstash | Link to Logstash [7.17] – Elastic. Configuring Logstash. – 2023. – [Electronic resource]. Access mode: <https://www.elastic.co/guide/en/logstash/current/configuration.html>.
8. Several conveyors. Links to Logstash [8.6] – Elastic. – 2023. – [Electronic resource] – Access mode: <https://www.elastic.co/guide/en/logstash/current/multiple-pipelines.html>.
9. Guide to the most important JVM parameters. JVM.settings. – 2023. – [Electronic resource] – Access mode: <https://www.baeldung.com/jvm-parameters>.
10. Puttagunta C., Kulkarni A., Bannon S. and others. Elastic. Creating a Logstash pipeline. Structure of a Config File [Electronic resource] – Access mode: https://www.elastic.co/guide/en/logstash/current/_configuration-file-structure.html.
11. Accessing Event Data and Fields in the Configuration [Electronic resource] – Resource access mode: <https://www.elastic.co/guide/en/logstash/current/event-dependent-configuration.html>.
12. Configuring Logash. Filebeat Review. – 2023. – [Electronic resource] – Access mode: <https://www.elastic.co/guide/en/beats/filebeat/current/filebeat-overview.html>.
13. Metricbeat Reference. Metricbeat overview [Electronic resource] – Access mode: <https://www.elastic.co/guide/en/beats/metricbeat/current/metricbeat-overview.html>.
14. Getting started with Winlogbeat. Winlogbeat Overview [Electronic resource] – Access mode: https://www.elastic.co/guide/en/beats/winlogbeat/current/_winlogbeat_overview.html.
15. Getting started with Packetbeat. Packetbeat overview.– 2023. – [Electronic resource] – Access mode: <https://www.elastic.co/guide/en/beats/packetbeat/current/packetbeat-overview.html>.
16. Auditbeat Reference: Auditbeat overview.– 2023. – [Electronic resource] – Access mode: <https://www.elastic.co/guide/en/beats/auditbeat/current/auditbeat-overview.html>.
17. Heartbeat Reference. Heartbeat overview.– 2023. – [Electronic resource] – Access mode: <https://www.elastic.co/guide/en/beats/heartbeat/current/heartbeat-overview.html>.
18. MAPS.ME. – 2023. – [Electronic resource] – Access mode: <https://android.biblprog.org.ua/ua/maps-me/>.
19. Configuring Logstash with GeoIP – Discuss Elastic Stack. – 2023. – [Electronic resource] – Access mode: https://www.elastic.co/guide/en/logstash/current/plugins-filters-geoip.html#_description_134

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-09>

УДК 004.932.2

Мельник Катерина Вікторівна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-9991-582X>

Багнюк Наталія Володимирівна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-7120-5455>

Лавренчук Світлана Василівна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-5453-3924>

Христинець Наталія Анатоліївна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-4836-7632>

Боба Роман Васильович, магістр

Омельчук Дмитро Юрійович, студент

Луцький національний технічний університет, м.Луцьк, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБЛИЧ

Мельник К.В., Багнюк Н.В., Лавренчук С.В., Христинець Н.А., Боба Р.В., Омельчук Д.Ю. Застосування методів машинного навчання для розпізнавання облич. У даній статті наведені методи машинного навчання для задачі розпізнавання облич за допомогою мови програмування Python, розглянуто важливі етапи процесу побудови моделей машинного навчання, такі як підготовка даних, вибір алгоритму, навчання моделі та оцінка її ефективності.

Ключові слова: розпізнавання облич, машинне навчання, математичні моделі, обробка даних.

Melnyk K., Bahniuk N., Lavrenchuk S., Khrystynets N., Boba R., Omelchuk D. Application of machine learning methods for face recognition. This article presents machine learning methods for face recognition using the Python programming language, discusses important stages of the process of building machine learning models, such as data preparation, algorithm selection, model training, and evaluation of its effectiveness.

Keywords: face recognition, machine learning, mathematical models, data processing.

Постановка наукової проблеми.

Розпізнавання облич є важливим завданням в галузі комп'ютерного зору та обробки зображень, і в Україні ця технологія тільки починає розвиватися. Вже багато компаній впроваджують системи розпізнавання облич у свої системи безпеки, особливо в системах контролю доступу та обліку робочого часу, що сприяє підвищенню рівня безпеки [1].

Завдання автоматичної класифікації за фотографією особи формулюється наступним чином: дана тренувальна вибірка N_k , з m зображеннями осіб, де I – зображення, $X(I)$ – функція, яка здійснює опис особи за зображенням. Завдання полягає в тому, щоб побудувати модель $y(X(I))$ і класифікувати людину з нових фотографій, не представлених у тренувальній вибірці (у тому числі, для нових людей).

У процесі розробки моделей розпізнавання облич можуть виникати деякі проблеми, які необхідно врахувати:

1. Недостатня кількість даних. Ефективне навчання моделей розпізнавання облич вимагає наявності великого обсягу різноманітних зображень облич. Брак даних може призвести до обмеженої здатності моделі до узагальнення та неправильної роботи на нових зображеннях.

2. Варіативність зображень. Людські обличчя можуть змінюватися залежно від різних параметрів, таких як освітлення, поза, вираз обличчя, аксесуари та інші фактори. Моделі розпізнавання облич повинні бути стійкими до таких варіацій і здатними коректно розпізнавати обличчя незалежно від цих факторів.

3. Збалансованість даних. Якщо набір даних для навчання моделі містить нерівномірну кількість зображень облич різних людей або класів, це може призвести до перекосу в розпізнаванні. Модель може бути більш схильною до розпізнавання деяких осіб або класів, представлених у більшій кількості в навчальних даних. Також може виникнути проблема недостатнього навчання (англ. «underfitting»), коли модель недостатньо навчена на тренувальних даних і не здатна виявити загальні закономірності або залежності в даних.

4. Проблема перенавчання (англ. «overfitting»). Це виникає, коли модель надмірно добре пристосовується до тренувальних даних, але погано узагальнюється до нових зображень. Модель може «запам'ятати» тренувальні дані і не здатна правильно розпізнавати нові обличчя або виявляти варіації.

Загалом, розпізнавання облич є складною задачею, що стикається з численними викликами.

© Мельник К.В., Багнюк Н.В., Лавренчук С.В., Христинець Н.А., Боба Р.В., Омельчук Д.Ю.

Проте застосування математичних методів та алгоритмів, разом з відповідними наборами даних та оптимізацією, може допомогти подолати ці проблеми та створити ефективні моделі розпізнавання облич. Додатково, використання технік попередньої обробки даних, які зменшують вплив варіативності, може допомогти поліпшити точність розпізнавання. Також важливо мати доступ до великого та репрезентативного набору даних, що дозволяє моделі краще узагальнювати та розпізнавати обличчя різних людей у різних ситуаціях.

Постійна розробка нових алгоритмів та методів розпізнавання облич дозволяє постійно вдосконалювати цю технологію і забезпечувати високу точність та стабільність роботи систем розпізнавання облич у різних сферах застосування.

Аналіз досліджень.

Незважаючи на безліч досліджень в галузі комп'ютерного зору та обробки зображень, які проводяться протягом останніх десятиліть, так і не було розроблено методів, що дозволяють надійно виявляти й розпізнавати обличчя людини за будь-яких умов.

Існує велика кількість методів та їх модифікацій, таких як: головних компонент [2], метод Віюлі-Джонса [3], метод прихованої Маркової моделі [4], еластичних графів [5], методи засновані на нейронних мережах [6], метод локальних бінарних шаблонів [7], геометричному методі розпізнавання [8] та ін.

Кожен з перелічених методів має свої переваги та недоліки, що впливають на швидкість та якість розпізнавання.

Наприклад, якщо розглядати задачу автоматичного визначення статі людини з використанням BIF ознак (biologically inspired features) [9] та методу опорних векторів [10], то алгоритм може включати наступні кроки, як наведено у роботі А.С. Спижевой та Д.В. Баландіна:

- 1) геометрична нормалізація та нормалізація яскравості особи;
- 2) обчислення біологічно обумовлених ознак;
- 3) зниження розмірності вектора-ознак за допомогою методу головних компонентів або методу, заснованого на використанні дерев рішень;
- 4) класифікація статі за допомогою методу опорних векторів з *rbf* ядром, реалізований у бібліотеці OpenCV [11].

Дослідження проводились на базі даних фотографій облич Labeled Faces in the Wild. Запропонований підхід для визначення статі людини за зображенням особи, використовуючи BIF ознаки і метод опорних векторів, досягає високої середньої точності класифікації – 96,18%. Це означає, що алгоритм здатний правильно визначати стать особи на зображенні в більш як 96% випадків, що є дуже точним результатом.

Додатково проведено порівняння двох методів зниження розмірності простору ознак – методу головних компонентів (Principal Component Analysis, PCA [12]) і методу, заснованого на виборі найбільш інформативних ознак. Застосування дерев рішень (ERT – Extremely Randomized Trees [13]) для оцінки інформативності компонент і вибору найбільш значущих ознак призводить до значної економії часу обробки кадру зображення.

Однак, при такому підході спостерігається незначне зниження середньої точності класифікації до 94,86%. Незважаючи на це зниження точності, запропонований підхід все ще перевершує інші розглянуті методи, що підтверджує його ефективність в розпізнаванні статі за зображенням обличчя.

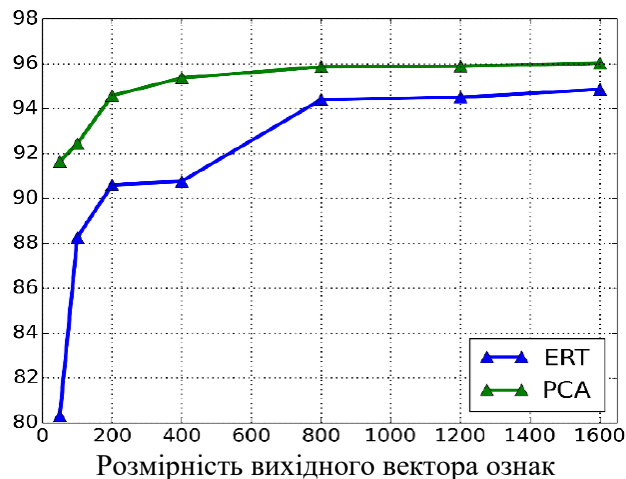


Рис.1 – Порівняння точності визначення статі залежно від кількості використовуваних ознак для методу основних компонентів і методу, заснованого на ранжируванні ознак за допомогою дерев рішень

Отже, запропонований підхід з використанням BIF ознак і методу опорних векторів виявляється ефективним у визначенні статі особи за зображенням. При використанні дерев рішень для вибору найбільш значущих ознак, можна досягнути економії часу обробки, хоча це може призвести до незначного зниження точності класифікації.

Розпізнавання облич є комплексною задачею [14] і включає такі частини: знайти людину на фото, провести аналіз на спотвореність зображення (повернута в бік голова, погане освітлення і т.д.), вибрати унікальні особливості обличчя та порівняти їх з наявними даними для розпізнавання.

У роботі [15] пошук людини на фото здійснюється способом, який називається: гістограма орієнтованих градієнтів (Histogram of Oriented Gradients, HOG [16]), як показано на рисунку 1.

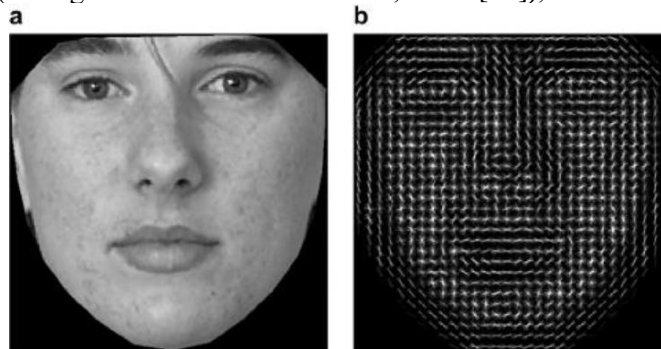


Рис. 2 – а) Приклад обличчя, б) Обличчя перетворене у HOG формат

Використовуючи цю техніку, можна легко знайти обличчя на будь-якому зображенні. Наступним кроком необхідно позиціонувати обличчя для розпізнавання. В роботі використовується алгоритм, який називається face landmark estimation (оцінка орієнтирів обличчя), як показано на рис.3, їх є 68.

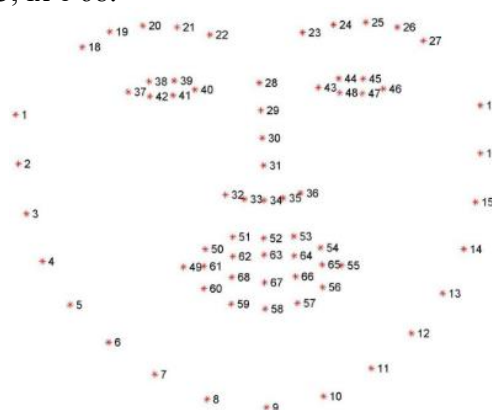


Рис. 3 – Орієнтири (landmarks), які присутні на кожному обличчі

Після знаходження всіх орієнтирів і провівши прості маніпуляції (повертання, збільшення або зменшення), обличчя буде розташоване у центрі. Процес розпізнавання невідомого обличчя – це процес порівняння його з усіма відомими зображення з тестової вибірки. Однак цей процес довготривалий, тому виділяють унікальні особливості обличчя. Для виділення 128 характеристик обличчя використовують згорткову нейронну мережу, процес навчання якої здійснювався за принципом переглядання трьох зображень одночасно [17]. Ідентифікація людини здійснюється методом опорних векторів (SVM).

В загальному, весь процес розпізнавання облич на зображеннях можна зобразити наступною схемою (рис.4) [18]:

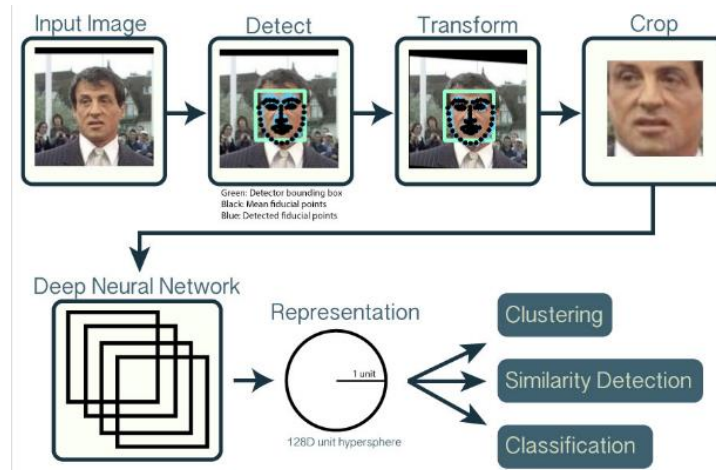


Рис. 4 – Процес розпізнавання обличчя

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

В роботі використовується база даних фотографій облич Labeled Faces in the Wild, створена для вивчення проблеми розпізнавання облич в лабораторії комп'ютерного зору Массачусетського університету [19,20]. Набір даних містить понад 13 000 зображень облич, зібраних з Інтернету. Кожне обличчя було позначено іменем зображеної людини. 1680 із зображених людей мають дві або більше різних фотографій у наборі даних. Єдиним обмеженням для цих облич є те, що вони були виявлені детектором облич Віюлі-Джонса.

В роботі ідентифікація людини здійснюється опорним векторним класифікатором (Support Vector Classifier, SVC) і показано, як метод зниження розмірності простору ознак (метод головних компонентів, PCA) впливає на точність класифікатора.

```
Out[24]: GridSearchCV(cv=5, estimator=SVC(class_weight='balanced', random_state=42),
n_jobs=2,
param_grid={'C': [0.1, 1, 10], 'gamma': [1e-07, 1e-08, 1e-06],
'kernel': ['rbf', 'linear']})

In [25]: print('The best model:\n', grid_search.best_params_)

The best model:
{'C': 10, 'gamma': 1e-07, 'kernel': 'rbf'}

In [26]: clf_best = grid_search.best_estimator_
pred = clf_best.predict(X_test)

In [28]: print(f'The accuracy is :{clf_best.score(X_test,Y_test)*100:.1f}%')

The accuracy is :87.7%
```

Рис. 5 – Фрагмент коду методу SVC

На рис.6 показано застосування методу головних компонентів (components=100), що збільшило середню точність класифікації з 87.7% до 90.2%.

```
In [35]: from sklearn.decomposition import PCA
pca = PCA(n_components=100, whiten=True, random_state=42)
svc = SVC(class_weight='balanced', kernel='rbf', random_state=42)
from sklearn.pipeline import Pipeline
model = Pipeline([('pca', pca),
                  ('svc', svc)])

In [42]: parameters_pipeline = {'svc__C': [1, 3, 10],
                               'svc__gamma': [0.001, 0.005]}
grid_search = GridSearchCV(model, parameters_pipeline)
grid_search.fit(X_train, Y_train)

Out[42]: GridSearchCV(estimator=Pipeline(steps=[('pca',
                                                PCA(n_components=100, random_state=42,
                                                    whiten=True)),
                                                ('svc',
                                                 SVC(class_weight='balanced',
                                                    random_state=42))]),
                       param_grid={'svc__C': [1, 3, 10], 'svc__gamma': [0.001, 0.005]})

In [43]: print('The best model:\n', grid_search.best_params_)

The best model:
{'svc__C': 1, 'svc__gamma': 0.005}

In [45]: model_best = grid_search.best_estimator_
print(f"The accuracy is: {model_best.score(X_test, Y_test)*100:.1f}%")

The accuracy is: 90.2%
```

Рис. 6 – Фрагмент коду застосування методів PCA та SVC

Висновки та перспективи подальшого дослідження

У статті проведено огляд базових алгоритмів для роботи із зображеннями та розпізнавання облич. Задача розпізнавання є комплексною задачею, яка вимагає багатьох кроків попередньої обробки зображень. Одним із вирішальних факторів є час роботи алгоритму розпізнавання та її точність. Показано, як використання методу зниження розмірності простору ознак підвищує середню точність класифікації з 87.7% до 90.2%.

Список бібліографічного опису

1. Який принцип роботи систем розпізнавання облич? Перспективи технології в Україні. URL: http://kristall-systems.net.ua/ua/novosti/kak_rabotaet_raspoznavanie_lits_perspektivy_tehnologii_v_ukraine/ (дата звернення: 30.05.2023).
2. Розпізнавання облич: від теорії до практики. Wiki ТНТУ. URL: <http://surl.li/hmeoo> (дата звернення: 30.05.2023).
3. Бембель, О. С. (2020). Застосування методу Віолі-Джонса для розпізнавання тривимірних об'єктів (Bachelor's thesis, КПІ ім. Ігоря Сікорського).
4. Повідайко, П. М., & Скороход, М. П. (2013). Дослідження методів розпізнавання емоцій людини в охоронних системах.
5. Sosnovskiy, V., & Khlevniy, A. (2019). Аналіз та дослідження основних методів розпізнавання обличчя. *Computer-integrated technologies: education, science, production*, (35), 192-197.
6. Тимошин, Ю. А., & Орленко, С. П. (2018). Алгоритм розпізнавання обличчя людей на базі згорткової нейронної мережі. *Адаптивні системи автоматичного управління*, 1(32), 166-173.
7. Ahonen, A. Hadid, M. Pietikainen. Face Description with Local Binary Patterns: Application to Face Recognition. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, №28(12), С. 2037-2041.
8. Golubyak, I. V., & Kosarevych, R. Ya. (2017). Face recognition methods. *Problems of information technologies*, (2), 158-164.
9. Guo G, Fu Y, Dyer CR, Huang TS. Image-based human age estimation by manifold learning and locally adjusted robust regression. *IEEE Trans Image Process*. 2008 Jul;17(7):1178-88. doi: 10.1109/TIP.2008.924280. PMID: 18586625.
10. Corinna Cortes, Vapnik Vladimir. Support-vector networks. *Machine learning* 20.3. 1995. P. 273-297.
11. OpenCV Face Recognition. OpenCV. URL: <https://opencv.org/opencv-face-recognition/> (date of access: 11.06.2023).
12. Abdi H., Williams L.J. Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4). 2010. P. 433-459.
13. Geurts Pierre, Damien Ernst, Louis Wehenkel. Extremely randomized trees. *Machine learning*, 63.1. 2006. P. 3-42.
14. Li S.Z., Jain A. Handbook of Face Recognition. Springer New York, 2011. P. 398.
15. Шаховська, Н. Б., & Басистюк, О. А. (2017). Розпізнавання обличчя за допомогою алгоритмів машинного навчання. *Штучний інтелект*.
16. Histograms of Oriented Gradients for Human Detection. URL: <https://lear.inrialpes.fr/people/triggs/pubs/Dalal-cvpr05.pdf> (date of access: 13.06.2023).
17. FaceNet: A Unified Embedding for Face Recognition and Clustering URL: https://www.cv-foundation.org/openaccess/content_cvpr_2015/app/1A_089.pdf (date of access: 13.06.2023)
18. OpenFace. URL: <https://cmusatyalab.github.io/openface/> (date of access: 13.06.2023).
19. Abeled Faces in the Wild. URL: <http://vis-www.cs.umass.edu/lfw/> (date of access: 28.05.2023).
20. Gary B. Huang, Manu Ramesh, Tamara Berg, and Erik Learned-Miller. Labeled Faces in the Wild: A Database for Studying Face Recognition in Unconstrained Environments. University of Massachusetts, Amherst, Technical Report

07-49, October, 2007.

References

1. What is the working principle of facial recognition systems? Prospects of technology in Ukraine. URL: http://kristall-systems.net.ua/ua/novosti/kak_rabotaet_raspoznavanie_lits_perspektiveyi_tehnologii_v_ukraine/ (access date: 30.05.2023).
2. Face recognition: from theory to practice. TNTU Wiki. URL: <http://surl.li/hmeoo> (access date: 05/30/2023).
3. Bembel, O. S. (2020). Application of the Viola-Jones method for recognition of three-dimensional objects (Bachelor's thesis, KPI named after Igor Sikorskyi).
4. Povidaiko, P. M., & Skorokhod, M. P. (2013). Research of methods of recognizing human emotions in security systems.
5. Sosnovskiy, V., & Khlevniy, A. (2019). Analysis and research of basic face recognition methods. *Computer-integrated technologies: education, science, production*, (35), 192-197.
6. Tymoshin, Yu. A., & Orlenko, S. P. (2018). Human face recognition algorithm based on convolutional neural network. *Adaptive automatic control systems*, 1(32), 166-173.
7. Ahonen, A. Hadid, M. Pietikainen. Face Description with Local Binary Patterns: Application to Face Recognition. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, №28(12), C. 2037-2041.
8. Golubyak, I. V., & Kosarevych, R. Ya. (2017). Face recognition methods. *Problems of information technologies*, (2), 158-164.
9. Guo G, Fu Y, Dyer CR, Huang TS. Image-based human age estimation by manifold learning and locally adjusted robust regression. *IEEE Trans Image Process*. 2008 Jul;17(7):1178-88. doi: 10.1109/TIP.2008.924280. PMID: 18586625.
10. Corinna Cortes, Vapnik Vladimir. Support-vector networks. *Machine learning* 20.3. 1995. P. 273-297.
11. OpenCV Face Recognition. OpenCV. URL: <https://opencv.org/opencv-face-recognition/> (date of access: 11.06.2023).
12. Abdi H., Williams L.J. Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4). 2010. P. 433-459.
13. Geurts Pierre, Damien Ernst, Louis Wehenkel. Extremely randomized trees. *Machine learning*, 63.1. 2006. P. 3-42.
14. Li S.Z., Jain A. Handbook of Face Recognition. Springer New York, 2011. P. 398.
15. Shakhovska, N. B., & Basistyuk, O. A. (2017). Face recognition using machine learning algorithms. *Artificial Intelligence*.
16. Histograms of Oriented Gradients for Human Detection. URL: <https://lear.inrialpes.fr/people/triggs/pubs/Dalal-cvpr05.pdf> (date of access: 13.06.2023).
17. FaceNet: A Unified Embedding for Face Recognition and Clustering URL: https://www.cv-foundation.org/openaccess/content_cvpr_2015/app/1A_089.pdf (date of access: 13.06.2023)
18. OpenFace. URL: <https://cmusatyalab.github.io/openface/> (date of access: 13.06.2023).
19. Abeled Faces in the Wild. URL: <http://vis-www.cs.umass.edu/lfw/> (date of access: 28.05.2023).
20. Gary B. Huang, Manu Ramesh, Tamara Berg, and Erik Learned-Miller. Labeled Faces in the Wild: A Database for Studying Face Recognition in Unconstrained Environments. University of Massachusetts, Amherst, Technical Report 07-49, October, 2007.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-10>

УДК 004.89

Проніна Ольга Ігорівна, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0001-7085-8027>

Решетников Антон Олександрович, студент

<https://orcid.org/0000-0002-8081-8835>

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, Україна

ФОРМУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ЛІНІЙНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ

Проніна О.І., Решетников А.О. Формування нейронних мереж для вирішення задачі лінійної класифікації.

Методів вирішення задачі лінійної класифікації існує велика кількість, проте одним із класичних методів вирішення цієї задачі можна назвати використання багатошарових нейронних мереж та баз знань. Тому наявність зручного та інтуїтивно зрозумілого середовища для створення баз знань, а також створення та навчання багатошарових нейронних мереж для аналітика має велике значення. У даній роботі розглядається модель багатошарової нейронної мережі. Проведено аналіз стану проблеми формування нейронних мереж для вирішення задачі класифікації. Розглянуто основні методи та підходи до формування багатошарових нейронних мереж для вирішення задачі класифікації, що застосовуються в дослідницьких цілях. Розроблена модель лягла в основу системи, яка дозволяє формувати та навчати моделі багатошарових нейронних мереж для вирішення задач лінійної класифікації. Усе це разом допоможе полегшити роботу дослідникам, які використовують нейронні мережі для визначення класу певного об'єкту.

Ключові слова: нейронні мережі, багатошаровий персептрон, лінійна класифікація, навчальна вибірка.

Pronina O., Reshetnykov A. Formation of neural networks for solving the problem of linear classification. There are a large number of methods for solving the linear classification problem, but one of the classic methods for solving this problem is the use of multilayer neural networks and knowledge bases. Therefore, the availability of a convenient and intuitive environment for creating knowledge bases, as well as the creation and training of multilayer neural networks for the analyst is of great importance. In this paper, we consider a model of a multilayer neural network. The analysis of the state of the problem of formation of neural networks for solving the problem of classification is carried out. The main methods and approaches to the formation of multilayer neural networks for solving the problem of classification used for research purposes are considered. The developed model formed the basis of a system that allows you to form and train models of multilayer neural networks for solving problems of linear classification. All this together will help facilitate the work of researchers using neural networks to determine the class of a particular object.

Keywords: neural networks, multilayer perceptron, linear classification, training set.

Постановка наукової проблеми. Задача класифікації у штучному інтелекті це задача розділення множини спостережень та об'єктів на групи, но заснуванні аналізу їх формального опису. У класифікації важливе значення має вибір властивостей (критеріїв), вони можуть бути суттєвими та несуттєвими, відповідно, класифікацію виконану за допомогою суттєвого критерію називають природною, а ту, що виконана на заснуванні несуттєвого критерію – штучною або допоміжною. При класифікації кожна одиниця спостереження буде віднесена до конкретної визначеної групи або категорії на заснуванні деякої якості властивості.

Задача лінійної класифікації полягає в тому, щоб розділити простір властивостей абстрактними багатовимірними площинами на підпростори таким чином, щоб в кожному із цих підпросторів були згруповані об'єкти одного класу або передбачити вірогідність належності об'єкту до кожного із класів, таким чином створюючи скоркарту об'єктів.

У математичній статистиці задачі класифікації називають також задачами дискримінантного аналізу [1].

У машинному навчанні задача класифікації вирішується зазвичай за допомогою навчання з учителем або одним із різновидів такого методу навчання [2].

Задача класифікації представляє собою одну із базових задач прикладної статистики та машинного навчання, а також штучного інтелекту в цілому. Це пов'язано із тим, що класифікація являє собою одну із найбільш зрозумілих та простих для інтерпретації технологій аналізу даних, а правила класифікації можуть бути сформульовані експертом на природній мові.

Сама по собі задача класифікації знайшла своє застосування в таких областях як: торгівля; телекомунікації; медицина; банківська сфера.

У торгівлі класифікація вирішує задачу розділення клієнтів та товарів на групи, що дозволяє оптимізувати маркетингові стратегії, а також стимулювати продажі та значно скорочувати непотрібні витрати.

У сфері телекомунікацій класифікація дозволяє розділити клієнтів за рівнями лояльності, щоб надати за цими рівнями бонуси клієнтам та розробити нові програми лояльності для майбутнього використання.

Для медицини та охорони здоров'я класифікація грає суттєву роль у методах діагностики захворювань, надає можливість виконувати аналіз знімків мозку, рентгену та симптомів, розділюючи захворювання за етапами протікання хвороби або діагностувати тип захворювання за симптомами. Також за допомогою такого підходу можна розділювати населення на групи ризику за схильністю до захворювання.

У банківській сфері класифікація використовується для розділення клієнтів за їхньою кредитною історією для визначення рівня довіри до клієнта, визначення кредитоздатності клієнтів та підтримки прийняття рішень про видачу кредиту клієнтам або відмови у видачі кредиту.

Найрозповсюдженішими методами вирішення задачі класифікації можна назвати нейронні мережі, логістичну регресію, дерева рішень, метод найближчого сусіда, машини опорних векторів та дискримінантний аналіз.

Нейронна мережа представляє собою математичну модель, а також її програмне та апаратне втілення, що реалізується за принципом організації та функціонування природних (біологічних) нейронних мереж, тобто за принципом роботи нервових клітин біологічного організму.

Багатошаровими нейронними мережами ж називають такий підхід до реалізації нейронних мереж, при якому мережа будується таким чином, щоб нейрони в ній були згруповані у шари, при цьому побудова відбувається за принципом поєднання усіх нейронів попереднього шару із усіма нейронами наступного. Важливо зазначити, що в середині одного шару нейрони незалежні та зв'язками не поєднуються. Шари у багатошарових мережах нумеруються зліва направо [3].

Мета дослідження. Метою даної роботи є створення та навчання інтелектуальної системи для формування багатошарових нейронних мереж та баз знань для вирішення завдання лінійної класифікації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У наш час можна знайти велику кількість робіт, що присвячені моделям нейронних мереж, побудованих для вирішення задачі класифікації. У цих роботах описані моделі використовуються як для класифікації зображень, так і для вирішення задачі класифікації на заснуванні вибірки даних. Далі наведено огляд статей із метою пошуку оптимального рішення для створення власної інтелектуальної системи для формування нейронних мереж призначених для вирішення завдання лінійної класифікації.

У статті [4] для вирішення завдання класифікації троянд, автор порівнює класифікацію на основі штучної нейронної мережі (ANN), згорткової нейронної мережі (CNN) і алгоритму вилучення ознак (FE). Таким чином, автор статті показує, що третій алгоритм значно прискорює швидкість роботи і значно покращує середню швидкість розпізнавання в порівнянні з першими двома алгоритмами.

У роботі [5] автори застосовують нейромережеві моделі (CNN, BiLSTM і BERT) для отримання корисної інформації з оглядів вин і класифікації вин за різними рейтинговими класами. Використовуючи велику колекцію відгуків про вино від Wine Spectator, дослідження показує, що BERT, нейромережевий фреймворк, нещодавно розроблений Google, має найкращі показники. У двокласовій класифікації (90-100 і 80-89) BERT досягає точності 89.12%, за нею йдуть BiLSTM (88.69%) і CNN (88.02%). У чотирикласній класифікації (95-100, 90-94, 85-89 і 80-84) BERT дає точність 81.57%, тоді як два інших дають точність 80%.

Згорткові нейронні мережі використовуються також у статті [6]. Автори використовують такий підхід для класифікації якості мармуру, розроблена архітектура згорткової нейронної мережі (CNN) та збільшення даних для зразків мармуру значно підвищили точність моделі в діапазоні від 0.922 до 0.961.

У дослідженні [7] впроваджені найсучасніші моделі глибокого навчання, засновані на підході трансферного навчання, для класифікації різних симптомів хвороби на зображеннях рисових рослин. Ефективність провідних попередньо навчених моделей згорткової нейронної мережі VGG-16 і GoogleNet (CNN) на утримуваному наборі даних оцінюється за допомогою методу триразової перехресної валідації. Навчені моделі VGG-16 і GoogleNet CNN досягли середньої точності класифікації 92.24% і 91.28% відповідно.

Проте в роботі [8] для вирішення задачі класифікації сигналів ЕКГ була висунута модель глибокої динамічної нейронної мережі (DDNN). Запропонована модель DDNN є динамічною гібридною моделлю глибокого навчання, що включає вейвлет-блок, згортковий блок, рекурентний блок і блок класифікації характеристик сигналу ЕКГ, але дана модель є дуже складною, тому її реалізацію у даній роботі не можна назвати виправданою.

Ще один варіант підходу до вирішення задачі класифікації представлений у статті [9]. Автори використовують багатошаровий перцептрон (MLP) для класифікації типів ландшафту, варто зазначити, що автори також наголошують на швидкості роботи та малі затрати ресурсів для даного підходу, що грає велику роль при роботі із системою на слабких персональних комп'ютерах.

Наступний приклад використання моделі перцептрону для класифікації наведено у роботі [10], автори використовують комбінацію багатошарового перцептрону та багатоатласного перцептрона для визначення стадії хвороби Альцгеймера. Основною перевагою перцептронів у цій статті автори вважають швидкість роботи та стабільність даної моделі нейронної мережі.

У роботі [11] автори провели масштабне дослідження алгоритмів для класифікації оливкових олій, згідно із результатами дослідження, найкращими алгоритмами виявилися алгоритми Random Forest, BayesNet, and LogitBoost зі результатами 93.88%, 91.84% та 93.88% відповідно, тому ці алгоритми було прийнято до уваги при виборі моделі нейронної мережі, що буде формуватися інтелектуальною системою.

Іще один варіант використання перцептрону для класифікації наведено у статті [12]. Автори використовують комбінацію багатошарового перцептрону та агентної моделі для класифікації землекористування та передбачення варіантів землекористування в майбутньому, при цьому багатошаровий перцептрон показав точність передбачення від 0.81 до 0.84, що для цієї моделі є дуже хорошим результатом.

У статті [13] той самий багатошаровий перцептрон використовується авторами для класифікацій та передбачення захворювань, що можуть бути супутниками діабету в людей на заснуванні вибірки даних про їх фізичний стан та даних аналізів. Запропонований алгоритм класифікації точно передбачив дані з вибором підмножини ознак і без неї, що ще раз вказує на універсальність перцептрону.

В останній розглянутій статті [14] автори аналізують життєво важливу інформацію про пацієнта, включаючи історію захворювання, вік, стать та рівень натрію в сироватці крові до та після госпіталізації за допомогою логістичної регресії, k-найближчого сусіда, багатошарового перцептрона та алгоритму класифікації ансамблю екстрадерев. Результати алгоритму класифікації показують, що запропонований MLP алгоритм дає більш високі результати прогнозування в порівнянні з іншими алгоритмами машинного навчання. Також матриця плутанини, оцінка Каппа, квадратне значення R і показники похибки. Результати показують, що класифікація MLP є більш підходящим прогностичним аналізом гіпонатріємії для хворих пацієнтів.

Після докладного аналізу літератури, наукових статей і публікацій, можна зробити висновок, що для кожного конкретного завдання класифікації потрібно підшукувати індивідуальний алгоритм навчання нейронної мережі та її будову, щоб досягнути максимального результату, проте існують методи формування мереж, що є більш розповсюдженими, це багатошаровий перцептрон та згорткові нейронні мережі. Однак багатошаровий перцептрон виступає більш універсальним та надійним рішенням, коли мова йде про задачу класифікації, а також швидшим у роботі, про що свідчать дослідження експертів.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Як відомо, перцептрон представляє собою математичну модель процесу сприйняття, тому через відносну простоту реалізації та надійність передбачення добре підходить для вирішення завдання лінійної класифікації.

Перцептрон дозволяє задовільню основні умови вирішення задач передбачення та класифікації: висока обчислювальна ефективність; відсутність обмежень на функцію розподілення даних; надає можливість обробки різнотипних експериментальних даних. (без перетворення усіх ознак до єдиної шкали) та інваріативність до допустимих шкал перетворення ознак; простота отримання результату та прив'язки до конкретної предметної області; робота при наявності пропусків в таблиці; робота у випадку коли кількість вимірюваних ознак перевищує кількість об'єктів та кількість об'єктів достатньо мала.

Для побудови багатошарового перцептрону було розроблено наступну математичну модель:

$$Z = \{X, Y, W, S, F, K, L, E\}, \quad (1)$$

де Z – множина ознак багатошарового перцептрона, що описується рядом ознак; X – таблиця значень, що поступає на вхід перцептрона, синапси нейрона; Y – дані вихідного шару перцептрона, тобто передбачені їм значення; W – ваги синапсів, які можуть бути як гальмуючими так і посилюючими; S –

взвážена сума вхíдних сигналів; F – функція активації нейрона, перетворююча взвážену суму у вхíдний сигнал; K – кiлькiсть шарів персе́птрону; L – коефіцієнт швидкості навчання; E – кiлькiсь епох навчання.

Таблиця значень (позначено як X в моделі) представляє собою вектор вхíдних даних, що буде використовуватися спочатку для навчання персе́птрону, а після навчання використовуватиметься для передбачення, зазвичай представляє собою вектор, що складається з ознак об'єкту, класифікація якого відбуватиметься в подальшому. Хоча персе́птрон може працювати і з текстовими значеннями, хорошою практикою виступає перетворення вектору таким чином, щоб він складався виключно з числових значень.

Ваги синапсів (позначено в моделі як W) – це матриця, ваг переходу до кожного наступного нейрону в наступному шарі із шару попереднього нейрона.

Зважена сума вхíдних сигналів або як їх ще називають синапсів (позначено в моделі як S) представляє собою суму ваг синапсів домножених на значення вхíдних синапсів плюс зміщення шару.

Функція активації нейрона (позначена як F в моделі) у штучних нейронних мережах визначає вихідний сигнал, що визначається вхíдним сигналом чи набором вхíдних сигналів.

Кiлькiсть шарів персе́птрону (в моделі зазначено буквою K) представляє собою кiлькiсть прихованих шарів багатошарового персе́птрону, що використовується для навчання побудованою моделі. Кiлькiсть шарів персе́птрону для кожної конкретної вибірки даних підбирається під час аналітичного процесу навчання, тобто буде використовуватися не статична кiлькiсть прихованих шарів, а кiлькiсть, що користувач інтелектуальної системи самостійно має обрати для навчання моделі для своєї конкретної задачі класифікації.

Коефіцієнт швидкості навчання (в моделі позначено як L) представляє собою параметр градієнтних алгоритмів навчання нейронних мереж, що дозволяє керувати величиною корекції ваг на кожній ітерації навчання, цей коефіцієнт обирається також для кожного конкретного випадку навчання моделі, єдиною умовою для цієї величини є обмеження від 0 до 1. Обрання значення коефіцієнту швидкості навчання є відповідальною справою, тому що занадто велике або мале значення корекції може завадити досягти великої точності моделі.

Кiлькiсть епох навчання (в моделі представлено як E) представляє собою кiлькiсть проходів для навчання моделі на вхíдній вибірці даних та корекції ваг. Одна епоха означає, що кожна вибірка в наборі навчальних даних мала можливість оновити внутрішні параметри моделі. У цій роботі було вирішено використовувати батч (batch), це передбачає, що епоха складається з однієї чи кількох пакетів-партій та на кожній із епох проходить обробка цього пакету.

Після розробки математичної моделі та з'ясування основних компонентів моделі, а також їх сутності були встановлені наступні характеристики багатошарового персе́птрону, що підлягають впливу зі сторони користувача інтелектуальної системи, що розробляється для формування багатошарових нейронних мереж: кiлькiсть шарів нейронної мережі; функція активації; коефіцієнт швидкості навчання; кiлькiсть епох. А також ті, на які користувач не може здійснювати прямого впливу: вхíдна послідовність; вихідна послідовність; ваги синапсів; зважена вага синапсів.

Виходячи з отриманої інформації та математичної моделі, відбувалося подальше проектування та розробка інтелектуальної системи, а також алгоритмів навчання багатошарового персе́птрону.

Функція активації нейронної мережі виконує перетворення зваженої суми вхíдних сигналів у вихідний сигнал. Стандартна комп'ютерна мікросхема може розглядатися як цифрова мережа функцій активації, які можуть приймати значення «правда» або «брехня» в залежності від входу. Це схоже на поведінку лінійного персе́птрону у нейронних мережах. Однак лише нелінійні функції активації дозволяють таким мережам вирішувати нетривіальні завдання з використанням малої кількості вузлів. У штучних нейронних мережах ця функція називається передавальною функцією [3].

Найрозповсюдженішими функціями активації для багатошарового персе́птрону можна назвати ReLU, сигмоїдальну та функцію гіперболічного тангенсу, тому їх було вирішено використовувати при реалізації інтелектуальної системи для формування багатошарових нейронних мереж.

Після первинного формування нейронної мережі та вибору функції активації для навчання необхідно підготувати навчальну вибірку та провести оптимізацію значень для покращення якості навчання сформованої моделі.

Обрана модель побудови нейронної мережі, а саме багатошаровий персе́птрон, може працювати як і з текстовими даними, так і з навчальними даними де наявні порожні значення, проте це сильно

загальмовує процес навчання моделі. Для позбавлення від цього негативного ефекту існує декілька підходів, які було вирішено реалізувати в інтелектуальній системі для попередньої підготовки вибірки.

В першу чергу потрібно позбавитися від строкових даних, для цього для кожного унікального значення рядку генерується числове значення та усі входження цього рядку у навчальній вибірці замінюються на це число. Для цього зручно використовувати словники, де ключем виступає строкове значення, а значенням виступає числовий еквівалент. Таким чином можна також замінити логічні значення, що задані у вибірці в текстовому форматі, наприклад, якщо логічне значення задане як «true» та «false», то вони будуть замінені на 1 та 0 відповідно.

Наступним кроком у підготовці навчальної вибірки виступає позбавлення від порожніх значень у стовпцях. Для вирішення цієї задачі існує декілька підходів:

- 1) заміна на середнє арифметичне стовпця;
- 2) заміна на випадкове значення від мінімального до максимального значення стовбця за законом нормального розподілення;
- 3) заміна на випадкове значення від мінімального до максимального значення стовбця за іншими законами розподілення.

Кожний із підходів має як свої плюси так і мінуси, наприклад заміна порожнього значення на середнє значення по стовпцю є найшвидшим варіантом обробки вибірки, проте дає однакові значення на усіх пробілах, що може негативно сказатися на кінцевій точності передбачення, через неточність даних. Заміна ж на випадкове значення від мінімального до максимального значення по стовпцю за будь-яким законом розподілення надасть більш природну корекцію навчальної вибірки, тому не так сильно вплине на якість передбачення, проте вимагають набагато більше ресурсів ніж розрахунок середнього арифметичного.

Інтелектуальна система для формування та навчання багатошарових нейронних мереж для вирішення задачі лінійної класифікації, яка була розроблена представляє собою десктопне програмне забезпечення для операційної системи Windows. Сам модуль формування та навчання нейронної мережі також був написаний на високорівневій мові програмування C#.

Для перевірки працездатності системи було вирішено використати класичну задачу лінійної класифікації, а саме задачу класифікації ірисів. Ця задача надасть можливість виявити якість розробленої інтелектуальної системи формування багатошарових нейронних мереж в умовах приближених до максимально сприятливих, тому що іриси мають досить чітку мережу розділення на три основних класи: Setosa, Versicolor та Virginica [15].

В експерименті було досліджено оптимальну структуру нейронної мережі для виконання задачі класифікації ірисів. В таблиці 1 наведено результати експериментів із різною кількістю шарів та кількістю нейронів у прихованих шарах, графік зміни якості навчання моделі під час експерименту можна побачити на рисунку 1, коефіцієнт швидкості навчання та кількість епох під час експерименту не змінювалися, навчання проведено за методом пакетного градієнтного спуску із перемішуванням датасету.

Таблиця 1 – Результати навчання моделі зі зміною кількості шарів та кількості нейронів у прихованих шарах

№ експерименту	Кількість прихованих шарів	Кількість нейронів у шарі	Відсоток розпізнавання, %
1	1	3	60,0
2	1	4	63,1
3	1	5	65,3
4	1	8	68,2
5	2	5	70,8
6	2	8	71,6
7	3	5	74,4
8	3	8	76,7

З аналізу таблиці 1 можна зробити висновок, що оптимальним варіантом для навчання можна вважати 3 прихованих шари та 8 нейронів у прихованих шарах, такий висновок можна зробити з якості передбачення та виходячи із міркувань економії ресурсів. Подальше збільшення кількості не є ліквідним, тому що існує великий ризик перенавчити модель.

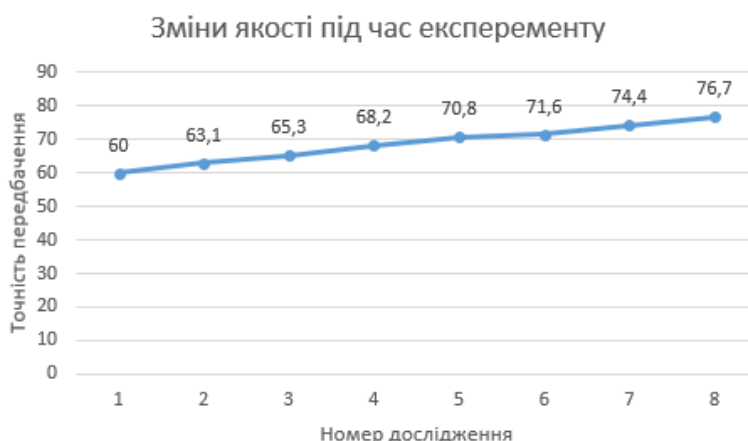


Рис. 1 – Графік змін якості навчання мережі протягом експерименту

Дані стосовно кращої будови моделі нейронної мережі, отримані під час цього експерименту, були відібрані для використання у наступному експерименті, в якому проводиться аналіз кількості епох навчання та їх впливу на якість моделі.

Для проведення цього експерименту використовується модель із кількістю шарів та нейронів у прихованих шарах, які були отримані під час попереднього експерименту та той самий датасет для вирішення задачі з лінійної класифікації ірисів, а також ті самі значення коефіцієнту швидкості навчання. Основна мета експерименту – визначення оптимальної кількості епох для навчання моделі багатошарової нейронної мережі. Результати експерименту у вигляді графічного представлення залежності якості навчання моделі від кількості епох можна побачити на рисунку 2.



Рис. 2 – Динаміка змін розпізнавання залежно від кількості епох

Можна помітити, що найкращий результат по співвідношенню якості навчання моделі до затрачених ресурсів спостерігається на кількості епох 100, якість навчання моделі становить 81,01%, при цьому затрати часу для навчання моделі не високі, а сама модель не перенавчена [16].

Навчену модель розробленої нейронної мережі із оптимальною кількістю шарів, нейронів у прихованих шарах та навчена на оптимальній кількості епох було збережено для проведення експерименту із тестування розробленого програмного забезпечення та порівняння із результатами передбачення бази знань, що була заповнена експертом.

Цей експеримент проводився із використанням розробленої інтелектуальної системи для формування багатошарових нейронних мереж для вирішення задачі лінійної класифікації. За допомогою розробленого програмного забезпечення було створено і навчено нейронну мережу для класифікації ірисів. Після цього було відібрано 30 наборів даних ірисів, по 10 варіантів кожного із трьох видів і на цій тестовій вибірці було проведено експеримент. На заснуванні даних, отриманих під

час експерименту було сформовано таблицю 2, в якій наведено підсумок точності розпізнавання по кожному класу.

Таблиця 2 – Підсумок точності розпізнавання по класах

Вихідний клас	Кількість вихідних зображень класу	Кількість вірно розпізнаних зображень	Кількість невірно розпізнаних зображень	Відсоток розпізнавання, %
Setosa	10	10	0	100
Verginica	10	10	0	100
Versicolor	10	10	0	100

Проаналізувавши таблицю 2 можна побачити, що модель справилася з усіма наборами вхідних даних відмінно та змогла розпізнати усі іриси за їх ознаками вірно.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. В результаті виконання роботи було розглянуто проблему формування та навчання нейронних мереж для вирішення задачі лінійної класифікації, особливостей процесу навчання, фактори що впливають на навчання мережі, розглянуті традиційні методи та підходи до побудови нейронних мереж, варіанти вирішення задачі лінійної класифікації за допомогою нейронних мереж та архітектури цих мереж.

Було проведено дослідження наукових статей для виявлення оптимального варіанту вирішення задачі лінійної класифікації за допомогою багатошарових нейронних мереж, розглянуто класичну модель перцептрону та алгоритм його навчання, розроблено алгоритм навчання багатошарового перцептрону на мові програмування C# із використанням методу пакетного градієнтного спуску та методу зворотнього розповсюдження помилки, розглянуто та виявлено найрозповсюдженіші функції активації нейрону для перцептронів, розроблено алгоритм підготовки навчальної вибірки для навчання моделі.

Так як система має бути універсальною, було розроблено алгоритм формування багатошарового перцептрону, що надає користувачу можливість налаштовувати кількість шарів, кількість нейронів у прихованих шарах, коефіцієнт швидкості навчання, функцію активації та вхідні параметри зі вхідної вибірки.

Список бібліографічного опису

1. Z. Vujovic. Classification Model Evaluation Metrics. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. - 2021. Volume 12. 599-606. 10.14569/IJACSA.2021.0120670.
2. P. Breiding, F. Sottile, J. Woodcock. Euclidean Distance Degree and Mixed Volume. Foundations of Computational Mathematics. – 2021. 10.1007/s10208-021-09534-8.
3. A. Rössig, M. Petkovic. Advances in verification of ReLU neural networks. Journal of Global Optimization. – 2021. 81. 1-44. 10.1007/s10898-020-00949-1.
4. Jiaojiao Hui. Research on Rose Classification Based on Neural Network Model. – 2022. 10.21203/rs.3.rs-1689613/v1.
5. Duwani Katumullage, Chenyu Yang, Jackson Barth, Jing Cao. Using Neural Network Models for Wine Review Classification. – 2022. 10.1017/jwe.2022.2.
6. İdris Karaali, Mete Eminağaoğlu. A convolutional neural network model for marble quality classification. – 2020. 10.1007/s42452-020-03520-5.
7. Rajesh Yakkundimath, Girish Saunshi, Basavaraj Anami, Surendra Palaiah. Classification of Rice Diseases using Convolutional Neural Network Models. – 2022. 10.1007/s40031-021-00704-4.
8. Tsu-Yang Wu, Naidan Feng, Yongquan Liang. A deep dynamic neural network model and its application for ECG classification. – 2022. 10.3233/JIFS-219314.
9. Chengchao Bai, Jifeng Guo, Linli Guo, Junlin Song. Deep Multi-Layer Perception Based Terrain Classification for Planetary Exploration Rovers. – 2020. 10.3390/s19143102.
10. Xin Hong, Kaifeng Huang, Jie Lin, Xiaoyan Ye, Guoxiang Wu, Longfei Chen, E Chen, Siyu Zhao. Combined Multi-Atlas and Multi-Layer Perception for Alzheimer's Disease Classification. – 2022. 10.3389/fnagi.2022.891433.
11. Ozgur Gumus, Erkan Yasar, Z Pinar Gumus, Hasan Ertas. Comparison of different classification algorithms to identify geographic origins of olive oils. – 2019. 10.1007/s13197-019-04189-4.
12. Zohreh Hashemi Aslani, Babak Omidvar, Abdolreza Karbassi. Integrated model for land-use transformation analysis based on multi-layer perception neural network and agent-based model. – 2022. 10.1007/s11356-022-19392-8.
13. Shahebaz Ahmed Khan, Seemakurthi, Akhil Jabbar. Co-Disease Prediction using Multilayer Perceptron and Classification from Diabetic Medical Data Sets. – 2019. 10.14419/ijet.v7i4.6.20450.
14. P. Theerthagiri, C. Krishnan, H. NishanA. Prognostic Analysis of Hyponatremia for Diseased Patients Using Multilayer Perceptron Classification Technique. – 2018. 10.4108/eai.17-3-2021.169032
15. Ke-Lin Du, M.N.s. Swamy. Perceptrons. – 2014. 10.1007/978-1-4471-5571-3_3.
16. Marius-Constantin Popescu, Valentina E. Balasliliana Perescu-Popescu, Nikos Mastorakis. Multilayer perceptron and neural networks. – 2019. 1109-2734.

References

1. Z. Vujovic. Classification Model Evaluation Metrics. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. - 2021. Volume 12. 599-606. 10.14569/IJACSA.2021.0120670.
2. P. Breiding, F. Sottile, J. Woodcock. Euclidean Distance Degree and Mixed Volume. Foundations of Computational Mathematics. - 2021. 10.1007/s10208-021-09534-8.
3. A. Rössig, M. Petkovic. Advances in verification of ReLU neural networks. Journal of Global Optimization. - 2021. 81. 1-44. 10.1007/s10898-020-00949-1.
4. Jiaojiao Hui. Research on Rose Classification Based on Neural Network Model. - 2022. 10.21203/rs.3.rs-1689613/v1.
5. Duwani Katumullage, Chenyu Yang, Jackson Barth, Jing Cao. Using Neural Network Models for Wine Review Classification. - 2022. 10.1017/jwe.2022.2.
6. İdris Karaali, Mete Eminağaoğlu. A convolutional neural network model for marble quality classification. - 2020. 10.1007/s42452-020-03520-5.
7. Rajesh Yakkundimath, Girish Saunshi, Basavaraj Anami, Surendra Palaiah. Classification of Rice Diseases using Convolutional Neural Network Models. - 2022. 10.1007/s40031-021-00704-4.
8. Tsu-Yang Wu, Naidan Feng, Yongquan Liang. A deep dynamic neural network model and its application for ECG classification. - 2022. 10.3233/JIFS-219314.
9. Chengchao Bai, Jifeng Guo, Linli Guo, Junlin Song. Deep Multi-Layer Perception Based Terrain Classification for Planetary Exploration Rovers. - 2020. 10.3390/s19143102.
10. Xin Hong, Kaifeng Huang, Jie Lin, Xiaoyan Ye, Guoxiang Wu, Longfei Chen, E Chen, Siyu Zhao. Combined Multi-Atlas and Multi-Layer Perception for Alzheimer's Disease Classification. - 2022. 10.3389/fnagi.2022.891433.
11. Ozgur Gumus, Erkan Yasar, Z Pinar Gumus, Hasan Ertas. Comparison of different classification algorithms to identify geographic origins of olive oils. - 2019. 10.1007/s13197-019-04189-4.
12. Zohreh Hashemi Aslani, Babak Omidvar, Abdolreza Karbassi. Integrated model for land-use transformation analysis based on multi-layer perception neural network and agent-based model. - 2022. 10.1007/s11356-022-19392-8.
13. Shahebaz Ahmed Khan, Seemakurthi, Akhil Jabbar. Co-Disease Prediction using Multilayer Perceptron and Classification from Diabetic Medical Data Sets. - 2019. 10.14419/ijet.v7i4.6.20450.
14. P. Theerthagiri, C. Krishnan, H. NishanA. Prognostic Analysis of Hyponatremia for Diseased Patients Using Multilayer Perceptron Classification Technique. - 2018. 10.4108/eai.17-3-2021.169032
15. Ke-Lin Du, M.N.s. Swamy. Perceptrons. - 2014. 10.1007/978-1-4471-5571-3_3.
16. Marius-Constantin Popescu, Valentina E. Balasliliana Perescu-Popescu, Nikos Mastorakis. Multilayer perceptron and neural networks. - 2019. 1109-2734.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-11>

УДК 681.3.05:004.056

Розломій Інна Олександрівна, к.т.н., старш. викладач

<https://orcid.org/0000-0001-5065-9004>

Косенюк Григорій Володимирович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-2103-3904>

Науменко Сергій Васильович, аспірант

<https://orcid.org/0000-0002-6337-1605>

Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, м. Черкаси, Україна

МЕТОД ВЕКТОРНОГО ШИФРУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ АВТОРСЬКОГО ШАБЛОНУ

Розломій І.О., Косенюк Г.В., Науменко С.В. Метод векторного шифрування інформації на основі використання авторського шаблону. В зв'язку зі стрімким збільшенням обсягу даних, що обробляються сучасними інформаційними системами, виникає потреба в компактному та надійному зберіганні цих даних. У статті описано метод шифрування зі стисненням, який дозволяє не тільки захистити конфіденційну інформацію від зловмисного використання, але й зберегти простір для зберігання даних за рахунок їх стиснення. Цей метод шифрування відрізняється від інших існуючих методів тим, що дозволяє ефективно зменшити розмір даних, що зберігаються. Даний метод шифрування базується на авторському шаблоні, що є прототипом шифрувальної таблиці. Для побудови авторського шаблону використано статистичний аналіз тексту та матричні примітиви. Новий метод векторного шифрування текстової інформації для одночасної реалізації стиснення та шифрування з прийнятною довжиною ключа та не надмірними обчислювальними можливостями техніки, коли ключ легко розподіляється, зберігається та запам'ятовується. Метод полягає в розбитті вхідного тексту на вектори з вагами та пошуку їх позицій у авторському шаблоні. Застосування цього методу дозволяє не тільки захистити дані від несанкціонованого доступу, а й забезпечити оптимізоване зберігання даних. Як показали дослідження, отримана зашифрована послідовність менша за вхідний текст на 65%. Такий підхід є особливо важливим в умовах зростаючої кількості даних, коли ефективне зберігання та передача інформації стають ключовими факторами успіху в будь-якій інформаційній системі. Описаний метод шифрування може знайти широке застосування в багатьох сферах, включаючи фінансові послуги, медичну та наукову галузі, де потреба в надійному та компактному зберіганні даних є найважливішою.

Ключові слова: компресійне шифрування, матрична решітка, метод Кардано, шифрувальна решітка, матричне криптографічне перетворення, дешифрування, стиснення.

Rozlomii I., Kosenyuk H., Naumenko S. Vector's method of information encryption based on the author's template.

In connection with the rapid increase in the amount of data processed by modern information systems, there is a need for compact and reliable storage of this data. Method of encryption with compression, which allows not only to protect confidential information from malicious use, but also to save storage space for data by the compression was describe in the article. This encryption method differs from other existing methods in that it effectively reduces the size of the data that is stored. This encryption method is based on the author's template, which is the prototype of the encryption table. Statistical text analysis and matrix primitives were used to build the author's template. A new method of using plaintext encryption to simultaneously implement compression and encryption with a long key and low hardware computing power, where the key is easily shared, stored and remembered. The method involves splitting the input text into vectors with weights and finding their positions in the author's template. Application of this method allows not only to protect data from unauthorized access, but also to ensure optimized data storage. Research has shown that the resulting encrypted sequence is 65% smaller than the input text. This approach is especially important in the conditions of the growing amount of data, when efficient storage and transfer of information become key success factors in any information system. The described encryption method can be widely used in many fields, including financial services, medical and scientific fields, where the need for reliable and compact data storage is the most important.

Key words: compression encryption, matrix grid, Cardano method, encryption grid, matrix cryptographic transformation, decryption, compression.

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. У світі зростає обсяг інформації, яку потрібно зберігати та передавати. Шифрування і стиснення є двома основними методами зменшення розміру даних та забезпечення їх конфіденційності. Але часто вони використовуються окремо один від одного, збільшуючи час та зусилля, необхідні для обробки даних.

Алгоритми стиснення дозволяють не тільки ефективно зберігати конфіденційні дані, а й значно зменшити розмір програми, яку за один прийом можна завантажити в пам'ять та виконати [1-2]. Існує велика кількість різних пакувальників файлів, деякі з них містять реалізації алгоритмів шифрування. Але в жодному з них алгоритм шифрування ніяк не пов'язаний з алгоритмом стиснення. Вони реалізовані як окремі алгоритми та використовуються окремо. Питання поєднання алгоритмів стиснення та шифрування стоїть давно.

Шифрування є важливою складовою сучасного світу, особливо в епоху цифрової технології і широкого використання Інтернету [3]. Захист конфіденційної інформації є важливою проблемою,

з якою стикаються усі галузі – від особистих комунікацій до фінансових установ і урядових органів. З огляду на все більшу кількість атак на мережеві системи та проникнення в приватні дані, відомі методи шифрування виявляються недостатньо ефективними. Тому виникає потреба в пошуку нових методів, які можуть допомогти вирішити ці проблеми.

Найбільшого поширення набули блочні симетричні шифри, так як вони забезпечують високий рівень захисту даних і відносно прості в реалізації. Ці шифри мають широке застосування в сучасних системах інформаційної безпеки, включаючи мережеву безпеку, електронну пошту, онлайн-банкінг, електронну комерцію та інші сфери. До блокових належать шифри перестановки та підстановки (заміни).

Одним з найвідоміших перестановочних методів шифрування є метод шифру маршрутної перестановки – метод, який використовується для перестановки символів в рядку повідомлення згідно з певними правилами, щоб отримати зашифрований текст [4-5]. Під час шифрування, символи повідомлення переставляються в рядки та стовпці шифрувальної таблиці, яка зазвичай має матричну форму та розмірність, задану ключем шифрування. Шифр маршрутної перестановки застосовується в багатьох сферах, включаючи комунікації в армії, поліції та інших силових органах, а також в криптографії.

Шифр маршрутної перестановки може бути відносно легко розшифрований, якщо не використовувати додаткові методи захисту, тому зазвичай використовується як частина складніших методів шифрування. Також, шифр маршрутної перестановки може бути вразливий до атак, які базуються на вивченні закономірностей розподілу символів у шифрованому тексті. Шифр маршрутної перестановки не є досконалим, але він може бути основою для побудови нового методу компресійного шифрування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасних умовах, коли цифрові технології стрімко розвиваються, а обсяги даних постійно зростають, важливість захисту інформації стає ще більшою. З цієї причини наукова спільнота сьогодні зосереджена на вирішенні проблем захисту даних, включаючи використання комплексних методів криптографії та стиснення даних. [6-7].

Багато публікацій присвячені шифрам перестановки, зокрема маршрутної перестановки, представником якої є шифрувальна таблиця [8-9]. Особливої уваги заслуговує робота [10], в якій запропоновано метод шифрування інформації за допомогою симетрично-поворотної решітки Кардано. Особливістю запропонованого методу є те, що ключі перестановки генеруються випадковим чином.

Щодо стиснення даних, варто відмітити роботу [11] в якій пропонується метод, який перетворює вихідні дані в компактну форму шляхом розпізнавання та використання шаблонів.

В статті [12] авторами пропонується комбінація найсучасніших методів стиснення та шифрування цифрових документів. Описується метод ефективного стиснення та шифрування даних, але ці два процеси розглядаються окремо один від одного.

В [13] описано забезпечення безпеки даних засобами криптографії та за допомогою стиснення. Авторами пропонується комплексний метод захисту, який передбачає стиснення даних з подальшим шифруванням.

Крім того, в роботі [14] запропоновано паралельний алгоритм стиснення та шифрування даних в мережах, оскільки через ці мережі регулярно проходить велика кількість інформації, яку, крім надійної передачі, необхідно ще й максимально компактно зберігати.

Огляд останніх досліджень підтвердив, що розробка нових методів криптографічного стиснення є перспективним напрямком. **Метою** статті є розробка методу векторного шифрування на основі використання прототипу шифрувальної таблиці для криптографічного стиснення даних.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Шифрувальні шаблони або трафарети – це інструменти, які використовуються для шифрування повідомлень та інформації [15]. Їх використання полягає в тому, що вони надають можливість шифрувати повідомлення, використовуючи певний набір символів або регулярних виразів. Шаблони можуть бути відкритими або закритими, тобто деякі символи можуть бути замінені знаками питання або іншими символами, які не вказують на конкретну букву або цифру.

Використання шаблонів дає можливість шифрувати повідомлення за допомогою заміни символів або груп символів на інші символи або групи символів. Наприклад, шаблон може вказувати на заміну всіх голосних букв на певний символ, що використовується як ключ для розшифрування. Це може допомогти збільшити безпеку повідомлень та інформації, оскільки

шаблон може бути захищений паролем або іншими методами аутентифікації, що забезпечують доступ лише авторизованим користувачам.

Також використовуються спеціальні трафарети для шифрування інформації у вигляді матриць або таблиць, де кожному символу відповідає певна комбінація координат. Ці трафарети можуть бути використані для шифрування повідомлень та інформації за допомогою заміни символів на координати, які потім можуть бути перетворені у відповідні символи за допомогою таблиці дешифрування [16].

Загалом, шифрувальні шаблони та трафарети є ефективними інструментами для захисту повідомлень та інформації від небажаних доступу та зламу. Однак, варто пам'ятати, що жоден метод шифрування не є повністю безпечним, і його слід використовувати лише як один з елементів комплексної системи захисту даних. Крім того, ефективність шаблонів та трафаретів може залежати від їх складності та частоти використання, тому важливо розробляти нові та більш складні шаблони для збільшення безпеки.

У сучасному світі шифрувальні шаблони та трафарети використовуються в багатьох галузях, включаючи інформаційну безпеку, фінансові технології, медіа та інтернет-технології. Зокрема, шаблони використовуються в алгоритмах шифрування та підпису електронної пошти, в безпечному обміні інформацією через мережу Інтернет, а також в захисті фінансових операцій та транзакцій.

У підсумку, шифрувальні шаблони та трафарети є потужними інструментами для захисту інформації від небажаного доступу та зламу. Вони можуть бути використані в різних галузях та контекстах, але варто пам'ятати, що жоден метод шифрування не є повністю безпечним і їх слід використовувати лише як частину комплексної системи захисту даних.

Існуючі методи блокового шифрування дають у результаті зашифрований текст такого ж розміру, як і вхідний текст. Метод, який пропонується в статті, дозволяє отримати зашифровану послідовність, яка буде мати менший розмір, ніж вхідна. Метод векторного шифрування дозволяє виконувати шифрування зі стисненням. Поєднання шифрування та стиснення сприяє ефективнішому зберіганню та захисту інформації. Рисунок 1 демонструє схему шифрування, розроблену за допомогою діаграми IDEF.

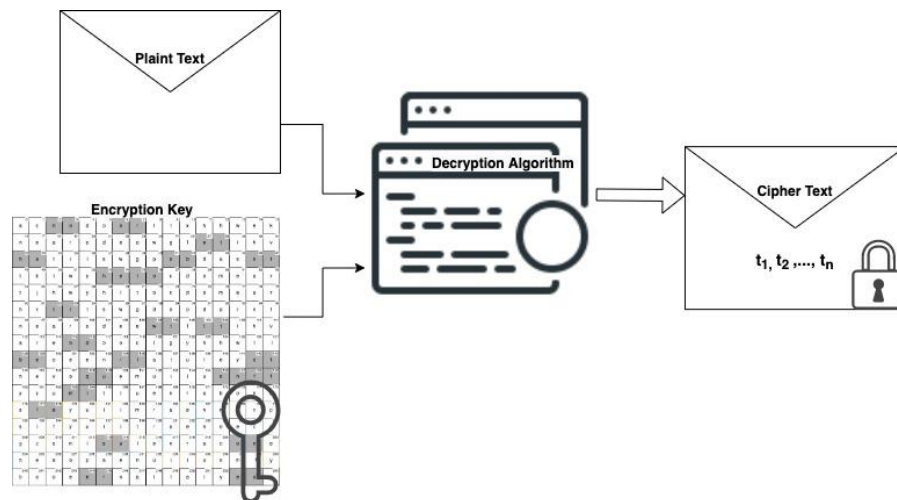


Рис. 1 – Шифрування, результатом якого є послідовність чисел (зсувів векторів)

Новий підхід для симетричного шифрування, в якому для шифрування відкритого тексту передбачає використання особливого ключа – авторського шаблону, який є прототипом шифрувальної решітки Кардано, але побудований за певними правилами, описаними в [17].

Правила побудови авторського шаблону, сформовані на основі статистичного аналізу тексту та матриці, наведені на рис. 2.

Генерація матриці

Максимальна кількість чисел: 127

Матриця:

11110111
0001111
1011110
11001010
1111011
0010100
1101110

Вхідний текст: 457 байт
Шифрований текст: 274 байт

0 => 0	1 => 100	2 => 125	3 => 25	4 => 51	5 => 87
6 => 78	7 => 42	8 => 117	9 => 17	10 => 8	11 => 108
12 => 70	13 => 34	14 => 59	15 => 95	16 => 94	17 => 58
18 => 35	19 => 71	20 => 109	21 => 9	22 => 16	23 => 116
24 => 43	25 => 79	26 => 86	27 => 50	28 => 24	29 => 124
30 => 101	31 => 1	32 => 77	33 => 41	34 => 48	35 => 84
36 => 126	37 => 26	38 => 3	39 => 103	40 => 56	41 => 92
42 => 69	43 => 33	44 => 11	45 => 111	46 => 118	47 => 18
48 => 19	49 => 119	50 => 110	51 => 10	52 => 32	53 => 68
54 => 93	55 => 57	56 => 102	57 => 2	58 => 27	59 => 127
60 => 85	61 => 49	62 => 40	63 => 76	64 => 93	65 => 57
66 => 32	67 => 68	68 => 110	69 => 10	70 => 19	71 => 119
72 => 40	73 => 76	74 => 85	75 => 49	76 => 27	77 => 127
78 => 102	79 => 2	80 => 3	81 => 103	82 => 126	83 => 26
84 => 48	85 => 84	86 => 77	87 => 41	88 => 118	89 => 18
90 => 11	91 => 111	92 => 69	93 => 33	94 => 56	95 => 92
96 => 16	97 => 116	98 => 109	99 => 9	100 => 35	101 => 71
102 => 94	103 => 58	104 => 101	105 => 1	106 => 24	107 => 124
108 => 86	109 => 50	110 => 43	111 => 79	112 => 78	113 => 42
114 => 51	115 => 87	116 => 125	117 => 25	118 => 0	119 => 100
120 => 59	121 => 95	122 => 70	123 => 34	124 => 8	125 => 108
126 => 117	127 => 17				

Рис. 2 – Правила побудови авторського шаблону

На рис. 2 показана матриця, згенерована випадковим чином, на основі якої побудовані правила перетворень чисел з заданого діапазону. В даному випадку перетворення здійснювалось над числами в діапазоні від 0 до 127, тобто авторський шаблон містить 128 комірок. Також, на рис. 2 показані результати матричних перетворень чисел з указанного діапазону, які вказують на номери комірок в авторському шаблоні. Авторський шаблон заповнюється на основі статистичного аналізу англomовного тексту. Кількість входжень тієї чи іншої літери в шаблон визначається частотою входження літери в текст. Наприклад, в англomовних текстах найчастіше зустрічається літера «е», відповідно в шаблоні кількість літер «е» буде найбільшою. Такий підхід до статистичного аналізу тексту часто використовують для створення шаблонів шифрування. Зміна матриці та нового тексту для статистичного аналізу дасть змогу отримувати нові варіанти авторських шаблонів, з іншим розміщенням літер.

В результаті обчислень, маємо авторський шаблон, який показаний на рис. 3.

a	0	s	1	u	2	e	3	r	4	i	5	h	6	o	7
g	8	n	9	s	10	l	11	t	12	e	13	a	14	t	15
t	16	e	17	c	18	t	19	h	20	n	21	s	22	l	23
r	24	i	25	h	26	o	27	a	28	s	29	w	30	e	31
e	32	w	33	s	34	a	35	o	36	h	37	i	38	o	39
m	40	r	41	n	42	e	43	t	44	c	45	d	46	t	47
t	48	d	49	e	50	u	51	n	52	r	53	o	54	f	55
o	56	h	57	l	58	p	59	e	60	z	61	s	62	a	63
t	64	d	65	d	66	u	67	m	68	r	69	n	70	e	71
o	72	h	73	i	74	o	75	e	76	w	77	s	78	a	79
e	80	y	81	s	82	a	83	o	84	h	85	k	86	p	87
m	88	r	89	n	90	f	91	t	92	d	93	e	94	u	95
t	96	e	97	a	98	t	99	f	100	n	101	r	102	l	103
q	104	i	105	h	106	o	107	a	108	s	109	u	110	e	111
a	112	t	113	v	114	e	115	f	116	i	117	i	118	o	119
h	120	n	121	s	122	l	123	t	124	e	125	b	126	t	127

Рис. 3 – Авторський шаблон для шифрування інформації

Метод шифрування, який описується, базується на використанні авторських шаблонів, які представляють собою решітки з числовими значеннями. Цей метод шифрування полягає в тому, що на кожному етапі шифрування знаходиться вектор у шаблоні, після чого його позиція та вага зберігаються. В результаті шифрування отримується послідовність пар чисел – вага вектора та зсув вектора, рис. 4.

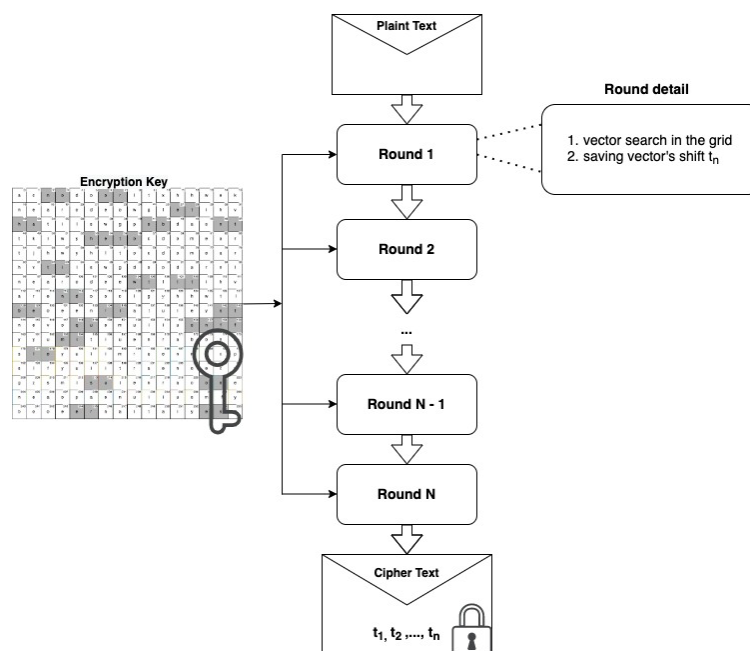


Рис. 4 – Схема методу векторного шифрування

Опис процесу шифрування даного методу можна розбити на кілька етапів:

- 1) створення авторського шаблону розміром $n \times n$, комірки котрого заповнені літерами англійського алфавіту;
- 2) розбиття вихідного тексту на вектори – блоки фіксованої довжини, які можуть бути оброблені окремо;
- 3) застосування авторського шаблону до кожного вектора. Для кожного елемента шаблону знаходиться вектор, що представляє його значення в бінарній формі;
- 4) для кожного вектора в шаблоні знаходиться його позиція та вага, і ці значення зберігаються в результаті шифрування;
- 5) послідовність пар чисел – вага вектора та зсув вектора складається в одну послідовність, яка є результатом шифрування.

Результат шифрування запропонованим методом показаний на рис. 5 і представляє собою послідовність пар чисел – вага вектора та зсув вектора в авторському шаблоні.

Текст шифрування

In his plays, Shakespeare revealed a very wide knowledge of many areas of life. The characters in his plays discuss many different topics, often with the knowledge of experts. But what is even more impressive about these plays is Shakespeare's use of the English language. His vocabulary was very large, and Shakespeare seems to have introduced many words to the language! Also, many of the phrases that are said by Shakespeare's characters are now used in everyday conversation. Today, writers often use quotations from Shakespeare's plays in their own works.

Вхідний текст: 457 байт
Шифрований текст: 274 байт

Результат шифрування

6,5,14,57,5,5,14,7,7,34,34,7,57,4,6,3-2,2,6,57,7,19-2,1,7,1,7-2,6,5,14,57,5,5,5,5,6,57,7,11-2,1-2,14,19-2,1,6,4,1,1,6,3-2,2,14,21-2,5,0-2,4,1,5,34,6,20-2,14,7,5,5,34,2,0-2,1,5,14,57,5,5,5,14,7,46-2,5,2,1,6,5,6,0,5,34,2,0,7,57,4,5,34,7,57,7,6,5,5,14,7,5,5,1-2,34,11-2,40-2,0,6,57,4,20-2,5,1-2,1,6,0,19-2,6,57,2,1,14,7,5,5,1,1,7,5,57,5,14,7,5,7,1,7-2,7,6,3-2,0,5,6,34,7,57,7,15-2,34,7-2,1,15-2,1-2,57,4,7,1,7-2,2,1,6,0,5,24,0,25-2,1,15-3,40-2,5,5,14,7,5,14,57,5,11-2,40-2,4,6,4,20-2,5,

Рис. 5 – Результат шифрування

Як видно з рис. 5, вхідні дані мали розмір 457 байт в результаті шифрування отримали 274 байти, що на 65% менше вхідного тексту.

Для дешифрування використовується збережена послідовність значень – ваги та позиції векторів. Кожен вектор відновлюється з використанням авторського шаблону, а зсув вектора відновлюється з використанням збереженого зсуву.

© Розломій І.О., Косенюк Г.В., Науменко С.В.

Для дешифрування зашифрованої послідовності пар чисел необхідно використовувати той самий авторський шаблон, що був використаний при шифруванні. На кожному етапі дешифрування необхідно знайти вектор, відповідний ваговий коефіцієнт та зсув зі шифртексту, і відновити відповідний блок даних.

Крім того, необхідно використовувати обернену матрицю, щоб відновити вихідний блок даних. Якщо використовувати той самий авторський шаблон та обернену матрицю, то можна гарантувати точність відновлення вихідних даних. Процес дешифрування полягає в пошуку відповідного вектора за його вагою та зсувом в авторському шаблоні.

Описаний метод шифрування дозволяє досягти високого рівня інформаційної безпеки за рахунок використання авторських шаблонів зі стійкими криптографічними властивостями. Крім того, використання цього методу дозволяє ефективно стискувати вхідні дані, що є важливим фактором при передачі даних в обмежених умовах, наприклад, при використанні мобільних мереж.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. У статті описується новий метод, який поєднує функції шифрування та стиснення, і дозволяє зменшити розмір даних, які необхідно передавати, забезпечуючи їх конфіденційність в одній операції. Застосування цього методу може спростити процес передачі та збереження великих обсягів даних, таких як відео чи аудіофайли, знижуючи час та зусилля, необхідні для їх обробки.

Запропонований метод векторного шифрування із стисненням, що описаний у статті, дозволяє захистити дані від несанкціонованого доступу, зберігаючи при цьому їх цілісність та зменшуючи обсяг пам'яті, необхідної для зберігання даних. Автори статті показують, що за допомогою використання авторського шаблону для знаходження позицій векторів, які утворюють вхідний текст, можна досягти ефективнішого стиснення даних та забезпечити їх інформаційну безпеку. Отримана послідовність пар чисел, яка є результатом шифрування, може бути легко розкодована з використанням зворотного процесу, що дозволяє відновити вихідний текст.

Цей метод може знайти своє застосування у багатьох сферах, де зберігаються великі об'єми даних та важлива їх конфіденційність. Він може бути особливо корисним для захисту фінансових даних, медичної інформації та інших важливих даних, що потребують ефективного захисту.

Список бібліографічного опису

1. Baig, M. W., Khan, M. F., and M. A. Raza (2015) Compression-Based Cryptography for Secure Wireless Sensor Networks. *Wireless Personal Communications*, 4(84), 2559-2572.
2. Ma, Z., Bai, G., and Z. Wang (2018) A Hybrid Compression-Encryption Method for Big Data in Cloud Storage. *IEEE Access*, 6, 29002-29013.
3. Raigoza, J., & Jituri, K. (2016) Evaluating performance of symmetric encryption algorithms. *International conference on computational science and computational intelligence*, 1378-1379.
4. Alenezi, M. N., Alabdulrazzaq, H., & Mohammad, N. Q. (2020). Symmetric encryption algorithms: Review and evaluation study. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 12(2), 256-272.
5. Saleem, K., Derhab, A., Orgun, M. A., Al-Muhtadi, J., Rodrigues, J. J., Khalil, M. S., & Ali Ahmed, A. (2016). Cost-effective encryption-based autonomous routing protocol for efficient and secure wireless sensor networks. *Sensors*, 16(4), 460.
6. Demertzis, I., Talapatra, R., & Papamanthou, C. (2018). Efficient searchable encryption through compression. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 11(11), 1729-1741.
7. Wang, C., Ni, J., & Huang, Q. (2015). A new encryption-then-compression algorithm using the rate-distortion optimization. *Signal Processing: Image Communication*, 39, 141-150.
8. Kansal, S., & Mittal, M. (2014). Performance evaluation of various symmetric encryption algorithms. *International conference on parallel, distributed and grid computing*, 105-109.
9. Biswas, M. H., Ali, M. A., Rahman, M., & Sohel, M. M. K. (2019). A systematic study on classical cryptographic cypher in order to design a smallest cipher. *Int. J. Sci. Res. Publ*, 9(12), 507-511.
10. Грицюк, Ю. І., Грицюк, П. Ю. (2015). Математичні основи процесу генерації ключів перестановки з використанням шифру Кардано. *Науковий вісник НЛТУ України*, 25(10), 311-323.
11. Jayasankar, U., Thirumal, V., & Ponnuramam, D. (2021). A survey on data compression techniques: From the perspective of data quality, coding schemes, data type and applications. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 33(2), 119-140.
12. Carpentieri, B. (2018). Efficient compression and encryption for digital data transmission. *Security and Communication Networks*, 112-118.
13. Sharma, R., & Bollavarapu, S. (2015). Data security using compression and cryptography techniques. *International Journal of Computer Applications*, 117(14).
14. Jiancheng, Q., Yiqin, L., & Yu, Z. (2017). Parallel algorithm for wireless data compression and encryption. *Journal of Sensors*, 219-230.
15. Kim, S. J., Park, H. J., and Kim, H. J. (2016) A New Encryption Method Using Huffman Coding and One-Time Pad. *Journal of Information Processing Systems*, 4(12), 627-638.
16. Liu, J., Zhou, T., Zhang, Z., Ke, Y., Lei, Y., & Zhang, M. (2018, December). Digital cardan grille: A modern

approach for information hiding. In Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Computer Science and Artificial Intelligence, 441-446.

17. Розломий І.О. (2022) Метод побудови матричних решіток Кардано для стиснення інформації. Вісник ХНУ. Технічні науки, 1(305), 85-90.

References

1. Baig, M. W., Khan, M. F., and M. A. Raza (2015) Compression-Based Cryptography for Secure Wireless Sensor Networks. *Wireless Personal Communications*, 4(84), 2559-2572.
2. Ma, Z., Bai, G., and Z. Wang (2018) A Hybrid Compression-Encryption Method for Big Data in Cloud Storage. *IEEE Access*, 6, 29002-29013.
3. Raigoza, J., & Jituri, K. (2016) Evaluating performance of symmetric encryption algorithms. *International conference on computational science and computational intelligence*, 1378-1379.
4. Alenezi, M. N., Alabdulrazzaq, H., & Mohammad, N. Q. (2020). Symmetric encryption algorithms: Review and evaluation study. *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 12(2), 256-272.
5. Saleem, K., Derhab, A., Orgun, M. A., Al-Muhtadi, J., Rodrigues, J. J., Khalil, M. S., & Ali Ahmed, A. (2016). Cost-effective encryption-based autonomous routing protocol for efficient and secure wireless sensor networks. *Sensors*, 16(4), 460.
6. Demertzis, I., Talapatra, R., & Papamanthou, C. (2018). Efficient searchable encryption through compression. *Proceedings of the VLDB Endowment*, 11(11), 1729-1741.
7. Wang, C., Ni, J., & Huang, Q. (2015). A new encryption-then-compression algorithm using the rate-distortion optimization. *Signal Processing: Image Communication*, 39, 141-150.
8. Kansal, S., & Mittal, M. (2014). Performance evaluation of various symmetric encryption algorithms. *International conference on parallel, distributed and grid computing*, 105-109.
9. Biswas, M. H., Ali, M. A., Rahman, M., & Sohel, M. M. K. (2019). A systematic study on classical cryptographic cypher in order to design a smallest cipher. *Int. J. Sci. Res. Publ*, 9(12), 507-511.
10. Gryciuk Yu.I. & Grytsyuk P.Yu. (2015) Mathematical Foundations of the generation of keys using a permutation cipher Cardano. *Scientific Bulletin of UNFU*, 25(10), 311-323.
11. Jayasankar, U., Thirumal, V., & Ponnurangam, D. (2021). A survey on data compression techniques: From the perspective of data quality, coding schemes, data type and applications. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 33(2), 119-140.
12. Carpentieri, B. (2018). Efficient compression and encryption for digital data transmission. *Security and Communication Networks*, 112-118.
13. Sharma, R., & Bollavarapu, S. (2015). Data security using compression and cryptography techniques. *International Journal of Computer Applications*, 117(14).
14. Jiancheng, Q., Yiqin, L., & Yu, Z. (2017). Parallel algorithm for wireless data compression and encryption. *Journal of Sensors*, 219-230.
15. Kim, S. J., Park, H. J., and Kim, H. J. (2016) A New Encryption Method Using Huffman Coding and One-Time Pad. *Journal of Information Processing Systems*, 4(12), 627-638.
16. Liu, J., Zhou, T., Zhang, Z., Ke, Y., Lei, Y., & Zhang, M. (2018, December). Digital cardan grille: A modern approach for information hiding. In Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Computer Science and Artificial Intelligence, 441-446.
17. Rozlomii, I.O. (2022) Method of construction matrix Cardano's grids for compression of information. *KHNU Bulletin: Technical Sciences*, 1(305), 85-90.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-12>

УДК 330.4

Томашко Андрій Петрович, аспірант

<https://orcid.org/0009-0007-1214-0683>

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

ПРИНЦИПИ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЛОГІСТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Томашко А. П. Принципи моделювання системи логістичного комплексу із застосуванням машинного навчання. У статті розкрито принципи моделювання системи логістичного комплексу із застосуванням машинного навчання. Наголошено, що за допомогою машинного навчання комп'ютер можна навчити виявляти певні закономірності, зустрічаючись з якими, він виконуватиме певні дії, якими можуть бути: розрахунок найкоротшого маршруту доставки, моментальне обчислення вартості перевезення, оптимізація розкладів, а також оптимізація експлуатації обладнання. Підкреслено, що застосування штучного інтелекту та машинного навчання для управління інвентаризацією та складом дозволяє оптимізувати витрати на зберігання та керування запасами, а також зменшити ймовірність помилок. Використання штучного інтелекту для аналізу даних про замовлення та споживчу поведінку дозволяє поліпшити прогнозування попиту та скоротити витрати на запаси. Використання алгоритмів штучного інтелекту дозволяє оптимізувати маршрути доставки та покращити ефективність процесу доставки. Система логістичного комплексу із застосуванням машинного навчання може автоматизувати рутинні завдання на складах та в центрах обробки замовлень, що дозволить скоротити витрати на персонал та збільшити продуктивність. Використання штучного інтелекту дозволяє створювати програмні системи управління логістикою, які можуть ефективно координувати процеси логістики та доставки. Представлено структуру бізнес-процесу системи управління логістичного комплексу застосування якої дозволяє підвищити ефективність та зменшити час обробки, за рахунок використання таких технологій як: збір даних із датчиків, встановлених на транспортних засобах, складах та інших об'єктах логістичної інфраструктури; використання міток RFID та інших технологій, що дозволяють відстежувати місцезнаходження вантажів та контролювати їх переміщення; використання даних, отриманих від комунікаційних мереж, таких як Інтернет речей (IoT), щоб моніторити обладнання та процеси на відстані; аналіз зовнішньої інформації; використання софту та програм для управління процесами логістики, які інтегрують усі зібрані дані та автоматизують ряд процесів.

Ключові слова: розумна логістика, складування, транспортування, машинне навчання, моделювання.

Tomashko A. Principles of modeling the logistics complex system using machine learning. The article describes the principles of modeling the logistics complex system using machine learning. It is emphasized that with the help of machine learning, a computer can be taught to detect certain patterns, meeting which, it will perform certain actions, which can be: calculation of the shortest delivery route, instant calculation of the cost of transportation, optimization of schedules, as well as optimization of equipment operation. It is emphasized that the application of artificial intelligence and machine learning for inventory and warehouse management allows to optimize the costs of storage and inventory management, as well as to reduce the probability of errors. Using artificial intelligence to analyze data about orders and consumer behavior can improve demand forecasting and reduce inventory costs. The use of artificial intelligence algorithms allows you to optimize delivery routes and improve the efficiency of the delivery process. A logistics complex system using machine learning can automate routine tasks in warehouses and order processing centers, which will reduce personnel costs and increase productivity. The use of artificial intelligence allows you to create logistics management software systems that can effectively coordinate logistics and delivery processes. The structure of the business process of the logistics complex management system is presented, the application of which allows you to increase efficiency and reduce processing time, due to the use of such technologies as: data collection from sensors installed on vehicles, warehouses and other objects of the logistics infrastructure; the use of RFID tags and other technologies that allow tracking the location of goods and controlling their movement; using data obtained from communication networks, such as the Internet of Things (IoT), to monitor equipment and processes remotely; analysis of external information; using software and programs to manage logistics processes that integrate all collected data and automate a number of processes.

Key words: smart logistics, warehousing, transportation, machine learning, modeling.

Вступ та постановка проблеми. Глобалізація сучасних інформаційних процесів та четверта промислова революція (Індустрія 4.0), включають в себе набір концепцій і технологій, які повинні використовуватися для посилення конкурентоспроможності промислових підприємств, посиляючись на концепції взаємозв'язку, цифровізації та автоматизації [1]. У цьому контексті Смарт Логістика націлена на успішне впровадження інтелектуальних та економічних ланцюжків поставок, заснованих на гнучких і кооперативних мережах і взаємопов'язаних організаціях.

Крім того, обмін інформацією здійснюється за допомогою сучасних інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ), мереж даних, акторів і датчиків, а також технологій автоматичної ідентифікації та відстеження матеріалів. Також, автоматизовані транспортні та складські системи, підтримувані автономними транспортними засобами, повинні забезпечувати частковий та/або повний самоконтроль систем. Крім того, розумна логістика може бути реалізована за допомогою технологічних концепцій кіберфізичних систем, Інтернету речей (IoT), відповідно як промислового Інтернету речей (IIoT) так і фізичного Інтернету (PI). Крім впровадження технологічних концепцій,

застосування концепцій штучного інтелекту, машинного та глибокого навчання можна вважати одним із найважливіших факторів успіху в процесі цифрової трансформації у логістичній сфері.

У цьому контексті штучний інтелект (ШІ) можна визначити як науку та розробку інтелектуальних машин з особливим акцентом на інтелектуальних комп'ютерних програмах. Машинне навчання (МН) вважається невід'ємною частиною штучного інтелекту, що стосується автоматизованого виявлення значущих шаблонів у наборах даних. Інструменти МН спрямовані на підвищення ефективності алгоритмів шляхом забезпечення здатності до навчання та адаптації на основі аналізу великих даних. Крім того, глибоке навчання (ГН) визначається як підклас МН у технологіях штучного інтелекту, який досліджує багато рівнів нелінійної обробки інформації для контрольованого та/або неконтрольованого вилучення та перетворення функцій, а також для аналізу шаблонів і класифікації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формулювання наукової думки у сфері машинного навчання є різноманітним та масштабним. У сучасній науковій площині з'являються роботи присвячені механізмам та принципам застосування штучного інтелекту у сфері логістики.

Вітчизняні українські вчені та закордонні колеги завжди зосереджувалися на дослідженні статичного логістичного та динамічного планування (також відомого як інтелектуальне планування системи зберігання). Дослідницькі сценарії включають автоматизовані термінали, виробничі цехи, автоматизовані склади, логістичні центри розподілу тощо [2, 3].

Статичний метод планування потребує попереднього отримання пакету інформації про завдання та статус системи та не змінить стратегію планування, доки завдання не буде виконано. Поява динамічного планування інтелектуальної логістики може компенсувати недоліки, пов'язані зі статичним плануванням, але метод динамічного планування, згаданий у дослідженні методу динамічного планування, насправді є методом переplanування, який переналаштує стратегію планування відповідно до стану системи [4]. Однак у складних середовищах розрахунків і оцінка інтелектуальних алгоритмів, таких як генетичний алгоритм і оптимізація роїв частинок, займають багато часу і часто не можуть відповідати вимогам системи в реальному часі. Дослідження науковців щодо динамічного планування інтелектуальної складської логістики в основному включають дві категорії. Один полягає в тому, щоб використовувати систему бази знань для попереднього запису оптимальних стратегій планування в різних станах в базу знань і вибору відповідних стратегій планування в базі знань відповідно до стану в процесі роботи [5, 6]. Однак цей метод залежить від масштабу бази знань. Якщо базі знань важко охопити всі можливі стани системи, це серйозно вплине на ефективність прийняття рішень щодо планування. По-друге, використовувати метод машинного навчання для вивчення стратегій планування в різних станах системи в автономному режимі [7, 8].

Так із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Feng Min, Yang Shuaihu, Yang Lei. [9], Di Capua Michele, Ciaramella Angelo, Prisco A. [10], Oguntola Ibrahim, Ülkü M. Ali, Saif Ahmed, Engau Alexander [11], Singh Amita, Wiktorsson Magnus, Hauge Jannicke [12], Aquino Bruno, Baquijano Ángel, Ovalle Christian [13], Kim Cho-Myong, Park Sang-Chan [14] та інші.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за окресленою тематикою, питання розкриття принципів моделювання системи логістичного комплексу із застосуванням машинного навчання залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Розкрити принципи моделювання системи логістичного комплексу із застосуванням машинного навчання.

Викладення основного матеріалу дослідження. Технології машинного навчання (МН) і штучного інтелекту (ШІ) все частіше використовуються у виробничих системах. Сфера логістики та управління ланцюгами поставок динамічно розвивається та модернізується в умовах впровадження штучного інтелекту.

Система логістичного комплексу являє собою складну транспортно-складську систему, роботу якої направлено на завантаження, сортування, пошук, складування, перевезення та зберігання продукції та товарів. Функціональна структура логістичного комплексу наведена на рисунку 1.

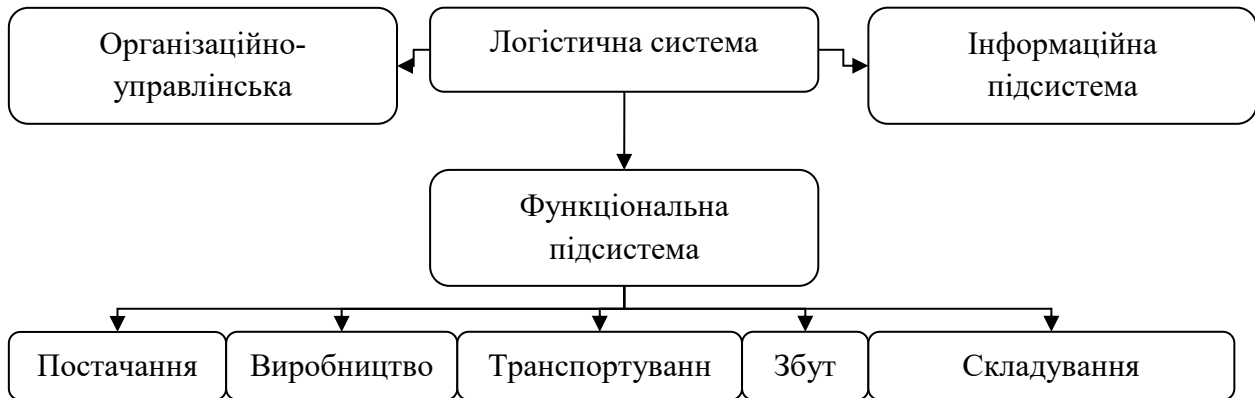


Рис. 1 – Функціональна структура логістичного комплексу

Система логістичного комплексу із застосуванням машинного навчання об'єднує управління та контроль якості ланцюга поставок для формування повних та впорядкованих інформаційних даних. Ефективні заходи управління та контролю здійснюються своєчасно, щоб якісне обслуговування та швидкість реагування відповідали персоналізованим потребам клієнтів, а також оптимізували всю систему.

У фактичній складській діяльності дві функції зберігання та розподілу тісно пов'язані та навіть об'єднані у єдине ціле. Що стосується функції зберігання, її часовий проміжок залежить від інвентаризації товарів. Чим довший цикл інвентаризації товарів, тим довша функція зберігання. Зберігання нульового запасу в основному базується на функції розподілу. Сезонні запаси та резервні запаси зазвичай відповідають складському зберіганню, тоді як запаси проміжного перетворення зазвичай відповідають складському зберіганню.

Завдяки моніторингу розташування складу в режимі реального часу покращується загальний рівень використання вантажу та швидкість обороту вантажу, а також забезпечується оперативне керування вантажем. Додатково максимізується якість інтелектуального управління складом. Контейнери та вантажні приміщення можуть мати відповідні інтелектуальні та фізичні властивості, сприяючи уніфікованому управлінню даними.

У процесі моделювання системи логістичного комплексу із застосуванням машинного навчання першим кроком є проектування та розробка аналізу попиту відповідно до потреб користувача. Аналіз попиту – це процес уточнення та розуміння. Ідея, яка використовується в управлінні складською логістикою, полягає в управлінні клієнтами, складами та транспортуванням. Принцип роботи бібліотеки логістичного комплексу полягає у наступному: адміністратор складу підтверджує відповідність товарів на складі. Якщо вони пройшли перевірку якості, їх помістять на склад; інакше вони повернуться до постачальника або списуться та утилізуються. Вихідне управління схоже на вхідне: після того, як користувач видає вихідне замовлення, правильність позиції перевіряється на основі основних даних матеріалу.

Інтелектуальна система управління логістичним комплексом у підсистемі складування, заснована на технології RFID Інтернету речей, яка в основному включає п'ять модулів:

- базове управління,
- управління вантажним простором,
- управління вантажем,
- управління складом,
- управління сповіщеннями.

Кожен модуль також містить декілька підфункцій.

Базове керування включає:

- керування користувачами,
- налаштування складу,
- налаштування системи,
- налаштування ініціалізації.

Керування розташуванням включає:

- керування полицею,
- керування місцеположенням,

- відповідність апаратного забезпечення розташування,
- керування кодом.

Управління вантажем включає:

- введення вантажу,
- модифікацію запиту вантажу,
- управління специфікацією вантажу,
- керування постачальником вантажу.

Управління складом включає:

- керування вхідними потоками,
- керування вихідними даними,
- управління запасами,
- статистичні запити.

Управління сповіщеннями включає:

- контейнерний шлюз,
- детектор розташування,
- інформація про попередження,
- інформація про виявлення поломок та ремонт.

Технологія RFID подібна до традиційної служби ПК на основі браузера, але представляє нові функції в поточній інтелектуальній системі управління складською логістикою. Система повністю враховує ці характеристики в аналізі бізнес-процесів, роблячи дизайн бізнес-процесів більш придатним для бізнес-обробки в новому середовищі.

Інтелектуальне управління логістичним комплексом із застосуванням машинного навчання вимагає участі багатьох секторів, зокрема відділу закупівель, постачальників, приймального складу, фінансового відділу, підрахунку запасів та іншої багатосторонньої участі, а також бізнес-процесу зв'язку з кількома процесами.

Загальний бізнес-процес складської та логістичної системи показаний на рисунку 2.

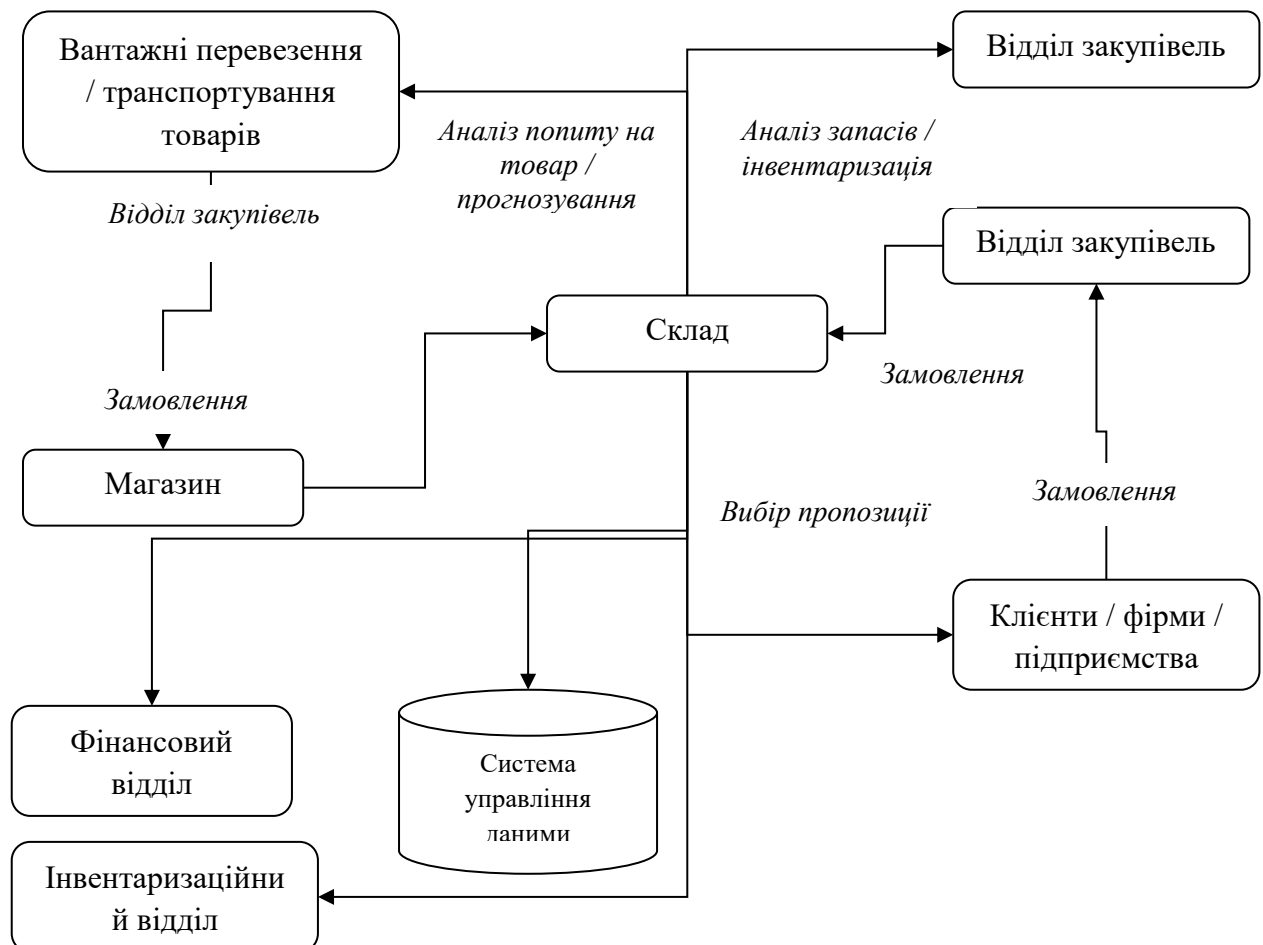


Рис. 2 – Структура бізнес-процесу системи управління логістичного комплексу

Згідно з певними правилами, підсистема управління розташуванням товарів розподіляє різні контейнерні позиції на складі на товари різних категорій і різних специфікацій. Управління вантажним простором зазвичай розрізняється різними кодами. Необхідно максимально повно використовувати існуючий вантажний простір, підвищити ефективність роботи вантажного простору, сформувати ефективний і впорядкований режим роботи сховища зі складськими та супровідними одиницями.

Комп'ютер на місці видає команду бібліотечної інформації мобільній дисковій бібліотеці на портативний пристрій зчитування RFID відповідно до плану бібліотеки. Власник бібліотеки читає мітку розташування та код мітки елемента. Якщо виявлено, що вони не збігаються, користувач отримує сповіщення на комп'ютер. Після того, як власник бібліотеки пройде один раз за вказаним маршрутом, статистична інформація бібліотеки надсилається на локальний комп'ютер. Тут повною мірою використовуються характеристики інвентаризації (повторне інтелектуальне інформаційне нагадування, періодичне нагадування різних ділянок, інтелектуальне нагадування всієї інвентаризації складу тощо). При необґрунтованій необхідності інвентаризації товарів на складі визначається кількість товарів у книзі та передається персоналу інвентаризації складу згідно з планом інвентаризації, а потім товари, що відповідають різниці, відповідно до системи зворотного зв'язку вносяться до бази товарів та інвентаризація вважається скоригованою та підтвердженою.

Конкретний процес складування продукції у рамках системи логістичного комплексу виглядає наступним чином:

- електронний процес складування товарів розпочинається зі збору основної інформації про складське зберігання, такої як інформація про складське замовлення та деталі складського зберігання товарів, а також передача складського замовлення до системи транспортування і генерація повідомлення про складське зберігання, яке отримує оператор;
- вхідний товар кодується за допомогою вибраної схеми кодування товару, закодована інформація записується в електронну етикетку, паперова етикетка друкується, а потім паперова та електронна етикетка склеюються разом, і інтегруються на упаковку товару;
- місце розташування товару, його кількість та умови зберігання, які вказані на етикетці передаються у фоновому режимі на комп'ютер. Комп'ютер автоматично визначає розташування та поступово завантажує номер розташування та відповідний номер елемента кожної операції на бездротовий термінал даних. Якщо дані не збігаються, операція надходження товарів або відмінність даних зворотного зв'язку завершується; тобто бізнес-одержувач припиняє роботу достроково.
- товари транспортуються персоналом складу до відповідного вантажного приміщення. Після того, як перевірена інформація підтверджена, товар поміщається у вантажне відділення (за необхідності номер вантажу та дані ярлика про місцезнаходження можуть бути змінені); дані в реальному часі збираються через мобільний термінал. Інформація передається в систему для забезпечення оновлення даних у реальному часі.

Конкретний процес доставки продукту у рамках системи логістичного комплексу виглядає наступним чином:

- системний центр видає інструкцію з планування вихідного потоку;
 - вихідна система генерує вихідне бізнес-замовлення та передає його на мобільний термінал;
 - персонал знаходить відповідне місце на основі месенджера мобільного терміналу;
 - відповідні товари беруться з позиції вантажу, і система автоматично оновлюється або знаходиться в стані очікування;
 - товари транспортуються до виходу, а інформація про вихідну операцію надсилається назад на комп'ютер на місці через фіксовану систему пристроїв читання та запису;
 - етикетка пломби зчитується за допомогою портативного пристрою та перевіряється;
 - інформація центральної бази даних оновлюється, щоб завершити вихідний бізнес-процес.
- Основною функцією управління постачальником є перегляд, додавання, зміна, видалення, дезактивація тощо. Детальний процес виглядає так:

- після запуску служби система автоматично перевіряє інформацію для входу. Якщо перевірка не вдається, персонал пропонує користувачеві повторно ввести інформацію, а потім перевірити ще раз, і доки перевірка не пройде успішно, завантажується основна інформація постачальника;

– вводиться інформація про постачальника, наприклад назва компанії, номер і контакт. Зіставляючи загальну інформацію постачальника, судять про те, чи існує інформація про даного постачальника, і якщо її немає, виконується відповідна обробка; у випадку, коли інформація існує, переглядається інформація про постачальника та пов'язуються відповідні товари;

– персонал і постачальник домовляються один з одним або додають, змінюють або видаляють інформацію про взаємодію з вантажем. В особливих випадках співпраця з постачальником може бути деактивована.

Висновки. У роботі розкрито принципи моделювання системи логістичного комплексу із застосуванням машинного навчання. У контексті Розумної логістики застосування технологій штучного інтелекту та машинного навчання все ще знаходиться на ранній стадії розробки. Більшість ідентифікованих досліджень є концепціями, лабораторними експериментами або знаходяться на дуже ранній стадії тестування. Зрілі промислові застосування все ще відсутні. Однак моделювання системи логістичного комплексу із застосуванням машинного навчання дозволить здійснити вдосконалення операційних логістичних процесів, наприклад, підходи до ідентифікації та відстеження, які можна розглядати як перспективні сфери в рамках Розумної логістики.

Результати цього дослідження слід використовувати як відправну точку для майбутніх досліджень щодо застосування технологій машинного навчання у сфері інтелектуальної логістики на промислових підприємствах, а також для практиків промислових компаній для успішного впровадження найсучасніших технологій. Тому, важливо інтегрувати різні галузі досліджень, наприклад, інформаційні технології, логістику, машинобудування, промислове будівництво, математику та статистику, у майбутні дослідницькі проекти.

Список бібліографічного опису

1. Коляденко С. Використання ланцюгів постачання в умовах діджиталізації економіки [Електронний ресурс] / Світлана Коляденко // Соціально-економічні проблеми і держава. 2021. Вип. 2 (25). С. 41-52. Режим доступу: <http://sepd.tntu.edu.ua/images/stories/pdf/2021/21ksvude.pdf>
2. Приходько А. Ю., Шуліка О. О. Застосування принципів «smart-логістики» при організації доставки вантажів. Збірник матеріалів 82-ї Міжнародної наукової конференції студентів: секція транспортних технологій. 2020. Харків : ХНАДУ. С.25–26.
3. Похильченко О. А. Тренди логістики та Supply chain management в проекції трансформаційних змін Industry 4.0. Інтелект XXI. 2019. № 3. С.149-154. URL : http://www.intellect21.nuft.org.ua/journal/2019/2019_3/26.pdf
4. Гармаш С. В. Інтеграція логістичних функцій в рамках логістичного менеджменту у системі управління сучасним промисловим підприємством / С. В. Гармаш // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" (економічні науки) : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2018. № 19 (1295). С. 104-107.
5. Dembińska, I., Frankowska, M., Malinowska, M., Tundys, B. (2018). Smart Logistics. Kraków-Legionowo: Wydawnictwo edu-Libri. Digital in 2017: Global Overview (2018). Retrieved from: <https://wearesocial.com/special-reports/digital-in-2017-global-overview>.
6. Liao, Leo & Li, Ang. (2022). An Intelligent System to Automate the Inquiry in Logistics Industry using AI and Machine Learning. P. 105-113. DOI: 10.5121/csit.2022.120109.
7. Wang, Yuqin. (2022). Logistics Finance Collaborative Development Model Based on Machine Learning. Computational Intelligence and Neuroscience. 2022. P. 1-8. DOI:10.1155/2022/1591371.
8. Jomthanachai, Suriyan & Wong, Wai & Khaw, Kw. (2023). An Application of Machine Learning to Logistics Performance Prediction: An Economics Attribute-Based of Collective Instance. Computational Economics. P. 1-52. DOI: 10.1007/s10614-023-10358-7.
9. Feng, Min & Yang, Shuaihu & Yang, Lei. (2023). Intelligent Logistics Scheduling Model Based on Q-Learning. DOI: 10.1007/978-981-99-0416-7_56.
10. Di Capua, Michele & Ciaramella, Angelo & Prisco, A.. (2023). Machine Learning and Computer Vision for the automation of processes in advanced logistics: the Integrated Logistic Platform (ILP) 4.0. Procedia Computer Science. № 217. P. 326-338. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.228.
11. Oguntola, Ibrahim & Ülkü, M. Ali & Saif, Ahmed & Engau, Alexander. (2023). On the Value of Shipment Consolidation and Machine Learning Techniques for the Optimal Design of a Multimodal Logistics Network. INFOR Information Systems and Operational Research. DOI: 10.1080/03155986.2023.2202079.
12. Singh, Amita & Wiktorsson, Magnus & Hauge, Jannicke. (2021). Trends In Machine Learning To Solve Problems In Logistics. Procedia CIRP. № 103. P. 67-72. DOI: 10.1016/j.procir.2021.10.010.
13. Aquino, Bruno & Baquijano, Ángel & Ovalle, Christian. (2022). Algorithm Based on Deep Learning to Improve the Logistics Management of a Company That Distributes Reading Material. DOI: 10.3233/FAIA220544.
14. Kim, Cho-Myong & Park, Sang-Chan. (2022). Recognition of Logistics Safety Labels Using Convolutional Neural Network and Machine Learning. Korean Logistics Research Association. № 32. P. 67-76. DOI: 10.17825/klr.2022.32.3.67.

References

1. Kolyadenko S. Use of supply chains in the context of digitalization of the economy [Electronic resource] / Svitlana Kolyadenko // Socio-economic problems and the state. 2021. Issue 2 (25). C. 41-52. Access mode: <http://sepd.tntu.edu.ua/images/stories/pdf/2021/21ksvude.pdf>.
2. Application of the principles of "smart logistics" in the organization of cargo delivery. Collection of materials of the 82nd International Scientific Conference of Students: Section of Transport Technologies. 2020. Kharkiv: KHNADU. C.25-26.
3. Trends in logistics and supply chain management in the projection of transformational changes in Industry 4.0. Intellect XXI. 2019. № 3. C.149-154. URL : http://www.intellect21.nuft.org.ua/journal/2019/2019_3/26.pdf.
4. Garmash S. V. Integration of logistics functions within the framework of logistics management in the management system of a modern industrial enterprise / S. V. Garmash // Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (economic sciences): a collection of scientific papers - Kharkiv: NTU "KHPI", 2018. № 19 (1295). C. 104-107.
5. Dembińska, I., Frankowska, M., Malinowska, M., Tundys, B. (2018). Smart Logistics. Kraków-Legionowo: Wydawnictwo edu-Libri. Digital in 2017: Global Overview (2018). Retrieved from: <https://wearesocial.com/special-reports/digital-in-2017-global-overview>.
6. Liao, Leo & Li, Ang. (2022). An Intelligent System to Automate the Inquiry in Logistics Industry using AI and Machine Learning. P. 105-113. DOI: 10.5121/csit.2022.120109.
7. Wang, Yuqin. (2022). Logistics Finance Collaborative Development Model Based on Machine Learning. Computational Intelligence and Neuroscience. 2022. P. 1-8. DOI:10.1155/2022/1591371.
8. Jomthanachai, Suriyan & Wong, Wai & Khaw, Kw. (2023). An Application of Machine Learning to Logistics Performance Prediction: An Economics Attribute-Based of Collective Instance. Computational Economics. P. 1-52. DOI: 10.1007/s10614-023-10358-7.
9. Feng, Min & Yang, Shuaihu & Yang, Lei. (2023). Intelligent Logistics Scheduling Model Based on Q-Learning. DOI: 10.1007/978-981-99-0416-7_56.
10. Di Capua, Michele & Ciaramella, Angelo & Prisco, A.. (2023). Machine Learning and Computer Vision for the automation of processes in advanced logistics: the Integrated Logistic Platform (ILP) 4.0. Procedia Computer Science. № 217. P. 326-338. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.228.
11. Oguntola, Ibrahim & Ülkü, M. Ali & Saif, Ahmed & Engau, Alexander. (2023). On the Value of Shipment Consolidation and Machine Learning Techniques for the Optimal Design of a Multimodal Logistics Network. INFOR Information Systems and Operational Research. DOI: 10.1080/03155986.2023.2202079.
12. Singh, Amita & Wiktorsson, Magnus & Hauge, Jannicke. (2021). Trends In Machine Learning To Solve Problems In Logistics. Procedia CIRP. № 103. P. 67-72. DOI: 10.1016/j.procir.2021.10.010.
13. Aquino, Bruno & Baquijano, Ángel & Ovalle, Christian. (2022). Algorithm Based on Deep Learning to Improve the Logistics Management of a Company That Distributes Reading Material. DOI: 10.3233/FAIA220544.
14. Kim, Cho-Myong & Park, Sang-Chan. (2022). Recognition of Logistics Safety Labels Using Convolutional Neural Network and Machine Learning. Korean Logistics Research Association. № 32. P. 67-76. DOI: 10.17825/klr.2022.32.3.67.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-13>

УДК 004.4

Філь Наталія Юріївна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-2081-7176>

Кудирко Ольга Миколаївна, асистент

<https://orcid.org/0000-0002-0858-9580>

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна

МЕТОД ОЦІНКИ ЯКОСТІ WEB-САЙТУ

Філь Н.Ю., Кудирко О.М. Метод оцінки якості web-сайту. В сучасних економічних умовах оцінка якості web-сайту є актуальною задачею тому. В роботі проведено аналіз та обрані критерії оцінки якості web-сайту. Розроблено метод оцінки якості web-сайтів. Особливістю розробленого методу є можливість оцінювання як всього web-сайту, так і працювати окремо з його елементами. Для оцінки значущості критеріїв було використано метод аналізу ієрархій Т. Сааті. Запропоновано модель багатокритеріальної оцінки якості web-сайту. Наведено приклад визначення коефіцієнтів значущості критеріїв якості web-сайту. Для прикладу використання методу оцінки якості web-сайту було розроблено інформаційний web-сайт «ЕКОХАРКІВ». Наведено приклад оцінки якості web-сайту за обраними критеріями.

Ключові слова: якість, оцінка, критерії, значущість, web-сайт

Fil N., Kudyrko O. Method of assessing the quality of a website. In current economic conditions, the assessment of the quality of a website is an urgent task. In the paper, the analysis has been conducted and criteria for assessing the quality of a website are selected. A method for assessing the quality of websites has been developed. The developed method is featured by the possibility of both evaluating the entire website and working separately with its elements. T. Saaty's method of hierarchy analysis was used to assess the significance of the criteria. A model of multi-criteria evaluation of website quality is proposed. An example of determining the coefficients of the significance of the quality criteria of a website is provided. As an example of using the method of assessing the quality of a website, the information website "EKOXHARKIV" has been developed. An example of assessing the quality of a website according to the selected criteria is presented.

Keywords: quality, evaluation, criteria, significance, website

Постановка наукової проблеми.

Цифрова трансформація торкається всіх аспектів життя людини. Сьогодні проходить процес цифрової трансформації суспільства – діджиталізація. Метою діджиталізації є підвищення якості життя та спрощення пошуку необхідних послуг або інформації. Процеси діджиталізації впливають практично на всі сфери: бізнесу, освіти, економіки, промисловості. Сьогодні для того, щоб стати успішним, необхідно мати цифрову присутність. Технології діджиталізації є запорукою комфортної та швидкої взаємодії зі світом, покращують якість продуктів та послуг, спрощують внутрішні та зовнішні комунікації.

XXI сторіччя – це інформаційний вік, тому пошук актуальної інформації має свою специфіку. Більшість населення стає цифровими споживачами, які шукають продукти, послуги й інформацію в Інтернеті. Згідно з даними Digital 2022 Global Overview Report 62,5% світового населення використовують інтернет, а витрати користувачів на мобільні програми в 2021 році збільшилися майже на 19% порівняно з позаминулим роком [1].

Завдяки Інтернету проблему інформаційного пошуку для рядової людини в цілому вирішено, тепер у неї завжди під рукою потрібна та актуальна інформація практично з будь-яких питань. Однак тут постає нова проблема. Інформації настільки багато і вона постійно оновлюється в тому числі свідомо некомпетентними, або свідомо людьми, що дезінформують суспільство.

Користувачі відвідуючи web-сайт прагнуть вирішити коректне завдання. Іноді особливості внутрішньої архітектури web-сайту можуть заважати або допомагати відвідувачеві досягти поставленої мети. На якість web-сайтів прямо або опосередковано впливає багато факторів, наприклад навігація, масштабування малюнків. З поширенням новітніх автоматизованих систем web-аналітики, багатьох власників web-сайтів вже не влаштовують абстрактні цифри про відвідування web-сайту. Статистика відвідуваності використовується для оцінки базових показників діяльності web-сайту та не завжди дає однозначні відповіді під час спроб оцінити якість web-сайту.

Кількість відвідування web-сайту не дає адекватної оцінки його якості. В даний час оцінка якості web-сайтів проводиться розробниками, їх оцінки не позбавлені суб'єктивізму та не завжди точні. Для розв'язання цього завдання необхідно використовувати різні критерії, які характеризують якість web-сайту очима користувачів і виявляють його недоліки.

Сьогодні в Інтернеті знаходиться велика кількість web-сайтів. Існують інформаційні web-сайти, які розробляються для надання актуальної та необхідної для користувача інформації. Вся

інформація подається та розміщується на сторінках web-сайту по різному, іноді сторінки перевантажені різними ефектами, які ускладнюють сприйняття інформації. Таким чином, в теперішній час є недостатнім наукове опрацювання та систематизація досвіду розробки якісного web-сайту. Тому проблема розробки багатокритеріального методу оцінки якості web-сайту є актуальною науково-прикладною задачею.

Аналіз досліджень.

Процесу розробки web-сайтів присвячено багато робіт. Так в роботі [2] представлено огляд двох класифікацій web-додатків, наведено основні переваги використання web-додатків. Автори розглянули етапи розробки сучасних web-додатків, сформулювали основні завдання, що виникають під час розробки, та запропонували шляхи їх вирішення. В роботі зазначено, що важливим кроком є побудова інформаційної архітектури web-сайту. Автори дослідили ключові особливості web-додатків.

В роботі [3] запропоновано класифікацію web-сайтів, проведено аналіз основних критеріїв оцінки їх якості як умови сталого розвитку електронного підприємництва. В якості критеріїв пропонується використовувати наступні: функціональність, дизайн, наповнення, технічні характеристики. Автори розробили концепцію оцінювання якості web-сайтів з використанням інформаційних моделей та методу дисперсійного аналізу. Але запропонована концепція є трудомісткою, обчислення може виконати тільки фахівець. Визначення інтегрального показника якості порталу проводиться без урахування думки користувачів.

Робота [4] присвячена сучасним підходам до маркетингового аналізу web-ресурсів в системі вищої освіти. Автори розглянули критерії та параметри, дотримання яких у процесі розробки, створення та ведення веб-сайту, дозволяють зробити його роботу найбільш ефективною.

В роботі [5] автори провели зовнішній аудит сайтів університетів та визнали, що для підвищення якості web-сайтів необхідно не тільки збільшувати глибину перегляду web-сайтів, та покращувати зручність інтерфейсу, розміщувати цікаву й актуальну інформацію, розподіляти сторінки на підрозділи, додавати інтерактивні елементи.

Кожен день на просторах Інтернету з'являється велика кількість різноманітних web-сайтів. Проблема оцінки якості веб-сайтів є актуальною науково-прикладною задачею, адже оцінювання якості web-сайтів має суб'єктивну інтерпретацію. Тому необхідно розробити метод оцінки якості web-сайтів на основі якісних і кількісних критеріїв із залучення експертів або досвідчених користувачів.

Розробка методу оцінки якості web-сайту

Основна складність оцінки якості web-сайту полягає в тому, щоб визначити оптимальну кількість метрик, відсіяти не дуже важливі показники та визначити ті з них, які безпосередньо впливають на якість web-сайту. Оцінювання якості web-сайту необхідно проводити як в цілому для всього сайту, так і окремих його елементів, сторінок.

Існує множина критеріїв, що характеризують якість web-сайтів. Вибір критеріїв залежить від цілей визначення оцінки якості web-сайту. При виборі критеріїв необхідно дотримуватись відсутності лінійної залежності критеріїв одного від одного. В протилежному випадку оцінювання якості web-сайту може призвести до некоректного результату.

Для оцінювання якості web-сайтів пропонуються такі критерії:

- 1) концепція web-сайту:
 - 1.1) визначення цільової аудиторії користувачів web-сайту;
 - 1.2) функціональність;
- 2) дизайн web-сайту:
 - 2.1) художнє оформлення web-сайту;
 - 2.2) стильова узгодженість (колір, шрифт);
- 3) інформаційне наповнення web-сайту у (контент):
 - 3.1) доступність подання інформації;
 - 3.2) структура подання інформації;
 - 3.3) систематизація змісту інформації;
 - 3.4) послідовність подання інформації;
 - 3.5) літературна грамотність та стиль;
 - 3.6) орфографічна грамотність;
 - 3.7) стилістична коректність;
 - 3.8) обсяг інформації;

- 4) структура та навігація web-сайту:
 - 4.1) розподіл на тематичні підрозділи;
 - 4.2) зручність використання інтерфейсу web-сайту (меню);
- 5) технічні характеристики web-сайту:
 - 5.1) надійність функціонування (перевірки, підказки);
 - 5.2) ефективне використання ресурсів сервера;
 - 5.3) інтерактивність web-сайту;
 - 5.4) функціональна злагодженість.

Критерії, які розглянуто складають відповідну ієрархію оцінки якості web-сайту (Рис.1).

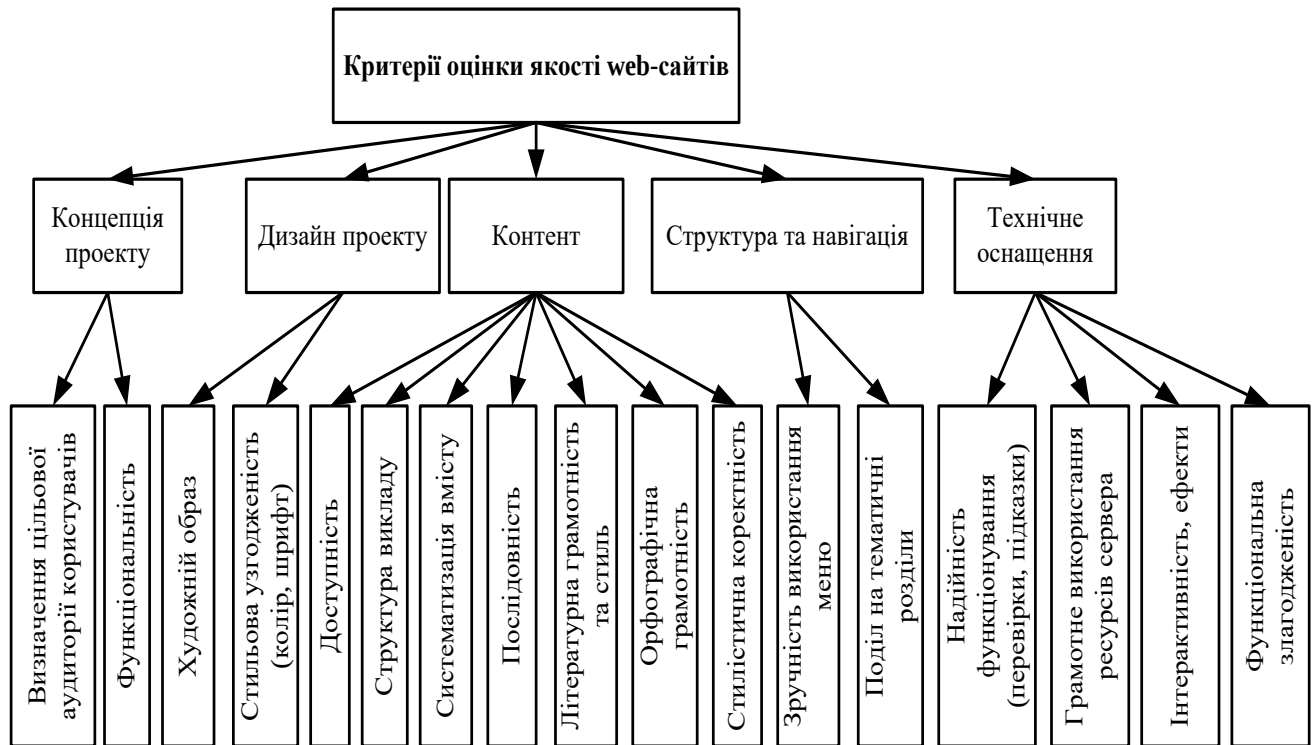


Рис. 1 – Ієрархія критеріїв оцінки якості web-сайту

Після визначення критеріїв оцінки якості web-сайтів, необхідно визначити їх важливість або значущість. Для визначення важливості критеріїв якості web-сайту потрібна інформація, яка дуже часто є недоступною або незрозумілою для простого користувача. Тому необхідно залучати фахівців-експертів, які нададуть необхідну інформацію або скористатися даними, що доступні в Інтернеті.

Проведений аналіз показав, що оцінка якості web-сайту є складною задачею, для її розв'язання пропонується використати експертні методи прийняття рішення. У випадках складності проблеми, її новизни, недостатності наявної інформації, неможливості математичної формалізації процесу вирішення доводиться звертатися до рекомендацій компетентних фахівців, які чудово знають проблему, – до експертів. В даний час експертні оцінки є найбільш поширеним способом отримання та аналізу інформації, що використовується при прийнятті рішень, будучи ефективним, а найчастіше і єдиним засобом вирішення широкого кола проблем, що недостатньо формуються [6].

При визначенні критеріїв для оцінки якості web-сайтів використання експертних методів дозволить врахувати досвід розробників, побажання користувачів та оцінки експертів.

Метод аналізу ієрархій – це конкретний набір прийомів та способів прийняття рішень у рамках системного підходу, обраного щодо складної проблемної ситуації [7-8].

На сьогоднішній день сфера застосування методу аналізу ієрархій широка і різноманітна. Метод аналізу ієрархій базується як на математичних, так і психологічних аспектах. Переваги методу аналізу ієрархій полягає:

- здійсненні зрозумілої та раціональної структуризації складної проблеми у вигляді ієрархії;

- одержання кількісної оцінки значимості якісних та кількісних критеріїв;
- можливості порівняння оцінок альтернатив.

Метод аналізу ієрархій складається з декількох кроків. Основні етапи прийняття рішення наведені в роботах [7-8]. Зазначимо, що основним завданням є складання матриць попарних порівнянь для кожного рівня ієрархії проблеми, яка розглядається.

За допомогою методу аналізу ієрархій визначмо коефіцієнти важливості критеріїв для оцінки якості web-сайту. Розрахунки виконувалися у Microsoft Excel. Матриці попарних порівнянь критеріїв всіх рівнів були розроблені експертами та наведені на рисунках 2-7.

Для кожної матриці попарних порівнянь, розмір яких більше 2, були розраховані індекс узгодженість і відношення узгодженості. За розрахунками експертні думки є узгодженими, бо відношення узгодженості не перевищує 10%.

	концепція проекту	дизайн проекту	контент	структура та навігація	технічне оснащення	Добуток	Корінь	Пріоритет
концепція проекту	1	1/3	1/5	1/3	1/3	0,007	0,375	0,061
дизайн проекту	3	1	1/3	2	1	2,000	1,149	0,188
контент	5	3	1	3	3	135,000	2,667	0,437
структура та навігація	3	1/2	1/3	1	1/2	0,250	0,758	0,124
технічне оснащення	3	1	1/3	2	1	2,000	1,149	0,188
	15,00	5,83	2,20	8,33	5,83		6,097	1,000
	0,92	1,10	0,96	1,04	1,10	$\lambda =$	5,118	
						$CI =$	0,030	
						$RI =$	2,641	

Рис. 2 – Матриця попарних порівнянь критеріїв першого рівня

Концепція проекту	визначення цільової аудиторії користувачів	функціональність	Добуток	Корінь	Пріоритет
визначення цільової аудиторії користувачів	1	1/2	0,500	0,707	0,333
функціональність	2	1	2,000	1,414	0,667
				2,121	1,000

Рис. 3 – Матриця попарних порівнянь критеріїв «Концепція проекту»

Контент	доступність	структура викладу	систематизація вмісту	послідовність	літературна грамотність та стиль	орфографічна грамотність	стилістична коректність	завантаженість (обсяг контенту)	Добуток	Корінь	Пріоритет
доступність	1	3	3	3	1/5	1/5	1/3	1/3	0,120	0,767	0,076
структура викладу	1/3	1	1/3	1/3	1/5	1/5	1/3	1/3	0,000	0,337	0,033
систематизація вмісту	1/3	3	1	1/3	1/5	1/5	1/3	1/3	0,001	0,443	0,044
послідовність	1/3	3	3	1	1/3	1/3	1/3	1/3	0,037	0,662	0,066
літературна грамотність та стиль	5	5	5	3	1	1	2	1/3	250,000	1,994	0,198
орфографічна грамотність	5	5	5	3	1	1	2	1/3	250,000	1,994	0,198
коректність	3	3	3	3	1/2	1/2	1	1/3	6,750	1,270	0,126
(обсяг контенту)	3	3	3	3	3	3	3	1	2187,000	2,615	0,259
	18,000	26,000	23,333	16,667	6,433	6,433	9,333	3,333		10,082	1,000
	1,370	0,868	1,025	1,095	1,272	1,272	1,175	0,865	$\lambda=$	8,943	
									$\Gamma Y=$	0,1347	
									$B Y=$	9,5498	

Рис. 4 – Матриця попарних порівнянь критеріїв «Контент»

Структура та навігація	поділ на тематичні розділи	зручність використання меню	Добуток	Корінь	Пріоритет
поділ на тематичні розділи	1	3	3,000	1,732	0,750
зручність використання меню	1/3	1	0,333	0,577	0,250
				2,309	1,000

Рис. 5 – Матриця попарних порівнянь критеріїв «Структура та навігація»

Дизайн проекту	художній образ	стильова узгодженість (колір, шрифт)	Добуток	Корінь	Пріоритет
художній образ	1	1/3	0,333	0,577	0,250
стильова узгодженість (колір, шрифт)	3	1	3,000	1,732	0,750
				2,309	1,000

Рис. 6 – Матриця попарних порівнянь критеріїв «Дизайн проекту»

Технічне оснащення	надійність функціонування (перевірки, підказки)	грамотне використання ресурсів сервера	інтерактивність, ефекти	функціональна злагодженість	Добуток	Корінь	Пріоритет
надійність функціонування (перевірки, підказки)	1	1/3	1/5	1/3	0,022	0,386	0,077
грамотне використання ресурсів сервера	3	1	1/3	2	2,000	1,189	0,238
інтерактивність, ефекти	5	3	1	3	45,000	2,590	0,517
функціональна злагодженість	3	1/2	1/3	1	0,500	0,841	0,168
	12,000	4,833	1,867	6,333		5,006	1,000
	0,925	1,148	0,966	1,064	$\lambda =$	4,103	
					$IY =$	0,034	
					$BY =$	3,821	

Рис. 7 – Матриця попарних порівнянь критеріїв «Технічне оснащення»

На третьому етапі обчислюються узагальнені коефіцієнти важливості для кожного критерію другого рівня, як зважені значення пріоритетів критеріїв першого та другого рівнів. Дерево коефіцієнтів важливості оцінки якості web-сайту першого та другого рівня представлено на рисунку 8.

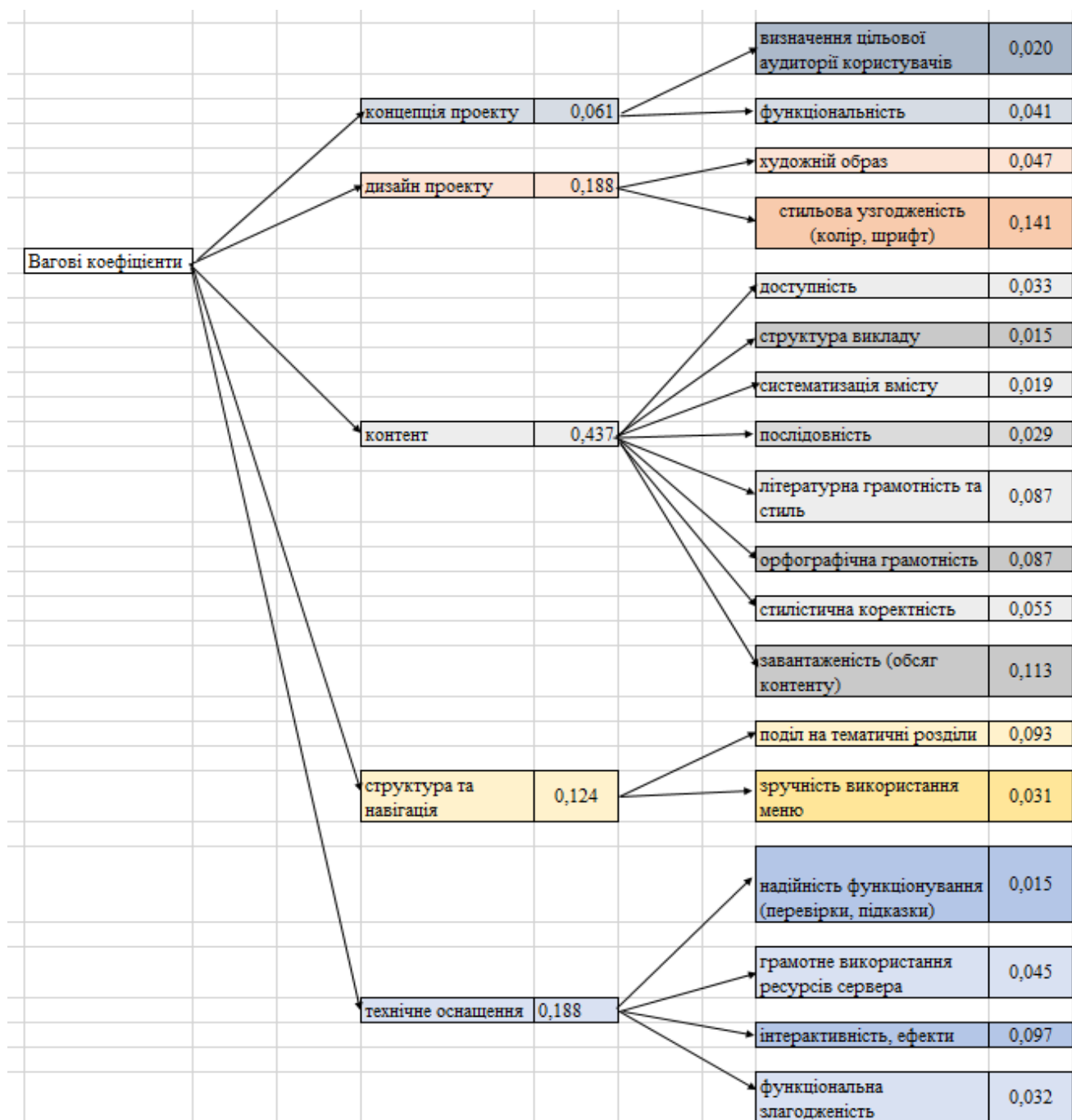


Рис. 8 – Дерево коефіцієнтів важливості критеріїв оцінки якості web-сайтів

Приклад використання методу оцінки якості web-сайту

Розглянемо оцінку розробленого інформаційного web-сайту.

При розробці проекту дизайну web-сайту використовувались HTML мова.

Стиль і вигляд сторінок та контенту задається за допомогою каскадних таблиць стилів CSS (Cascading Style Sheets).

Оцінку web-сайту пропонується зробити користувачам. Для підвищення відповідальності користувачу пропонується авторизуватися на сайті, для чого розроблена спеціальна форма (Рис. 9).

Реєстрація

Логін

Введіть свій логін

Зображення профіля

Вибрати файл Файл не вибрано

Пароль

Введіть пароль

Підтвердження пароля

Підтвердіть пароль

Реєстрація

Маєте акаунт? - [Увійдіть!](#)

Останні новини

Дженніфер Еністон повідомила про смерть 89-річного батька-актора

Рис. 9 – Зовнішній вигляд форми реєстрації

Реєстраційна інформація завантажується на сторінку `signup.php` та перевіряється на наявність збігів. Інформація зберігається якщо аналогічної інформації не має в базі даних. В протилежному випадку з'явиться повідомлення про наявність акаунту користувача. Після успішної реєстрації управління передається на головну сторінку.

Для оцінювання якості web-сайту необхідно авторизуватись (Рис. 10).

Авторизація

Логін

Введіть логін

Пароль

Введіть пароль

Вхід

Останні новини

Дженніфер Еністон повідомила про смерть 89-річного батька-актора.

Тато зірки був відомим актором "мільних опер".

Голлівудська акторка Дженніфер Еністон повідомила про

Рис. 10 – Зовнішній вигляд форми авторизації

Для оцінювання якості web-сайту розроблена спеціальна сторінка і форма «ОЦІНКА САЙТІВ» (Рис. 11). Форма містить питання, які допомагають визначити якість web-сайту за обраними критеріями.

При оцінювання якості web-сайту новим користувачем оцінки за кожним критерієм додаються до попередніх та розраховується середнє арифметичне всіх оцінок (Рис. 12).

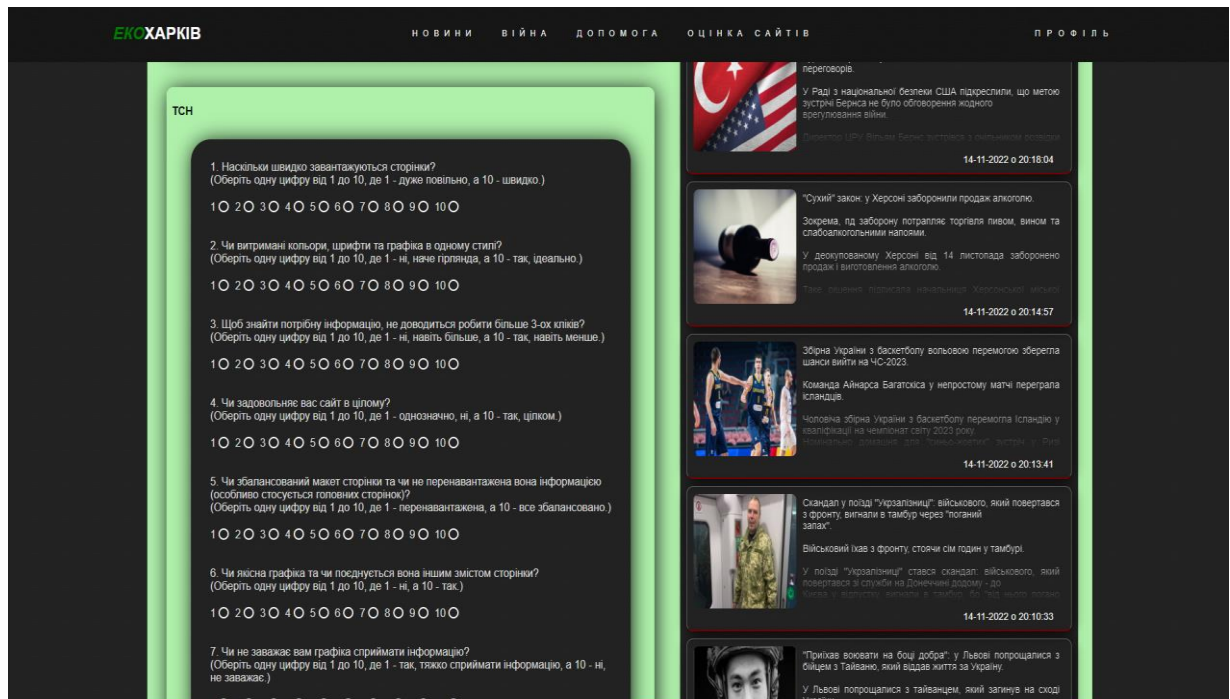


Рис. 11 – Зовнішній вигляд форми оцінювання сайтів

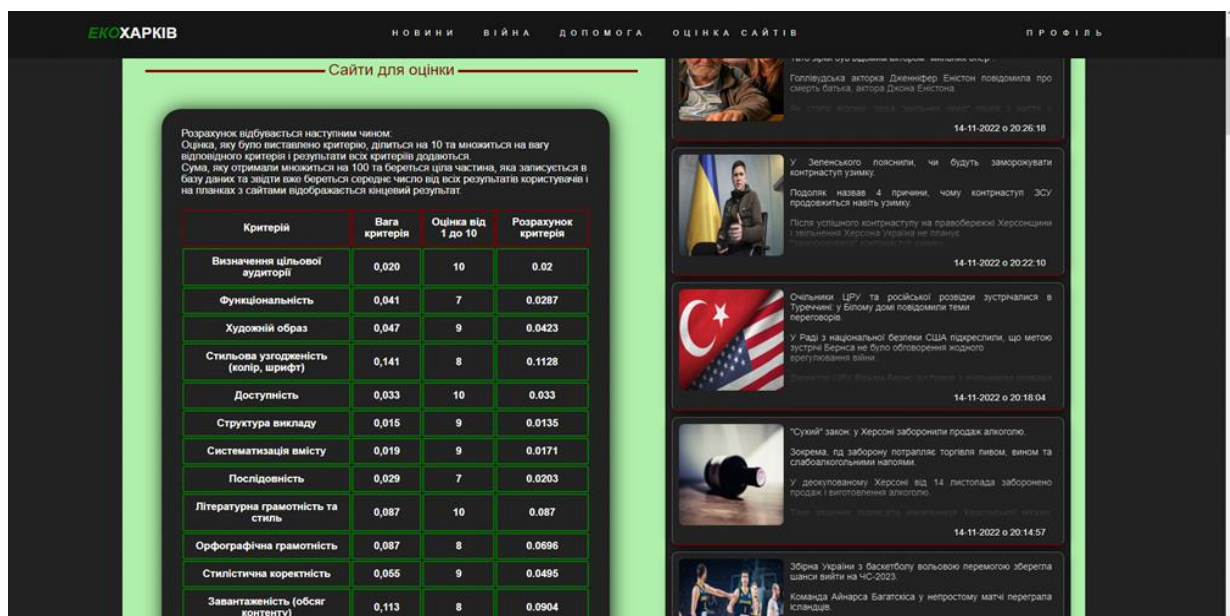


Рис. 12 – Форма для обчислення оцінок web-сайту

Загальна оцінка якості web-сайту розраховується як середньозважена оцінка з урахуванням коефіцієнтів важливості всіх критеріїв (Рис. 13).

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

В сучасних економічних умовах оцінка якості web-сайту є актуальною задачею тому, що вартість web-сайту багато в чому визначається його якістю.

В роботі проведено аналіз та обрані критерії оцінки якості web-сайту. У роботі запропоновано метод оцінки якості web-сайтів за багатьма критеріями. Особливістю розробленого методу є можливість оцінювання якості як всього web-сайту повністю, так окремих його елементів, сторінок.

Для оцінки важливості критеріїв було використано метод аналізу ієрархій Т. Сааті. Запропоновано метод багатокритеріальної оцінки якості web-сайту.

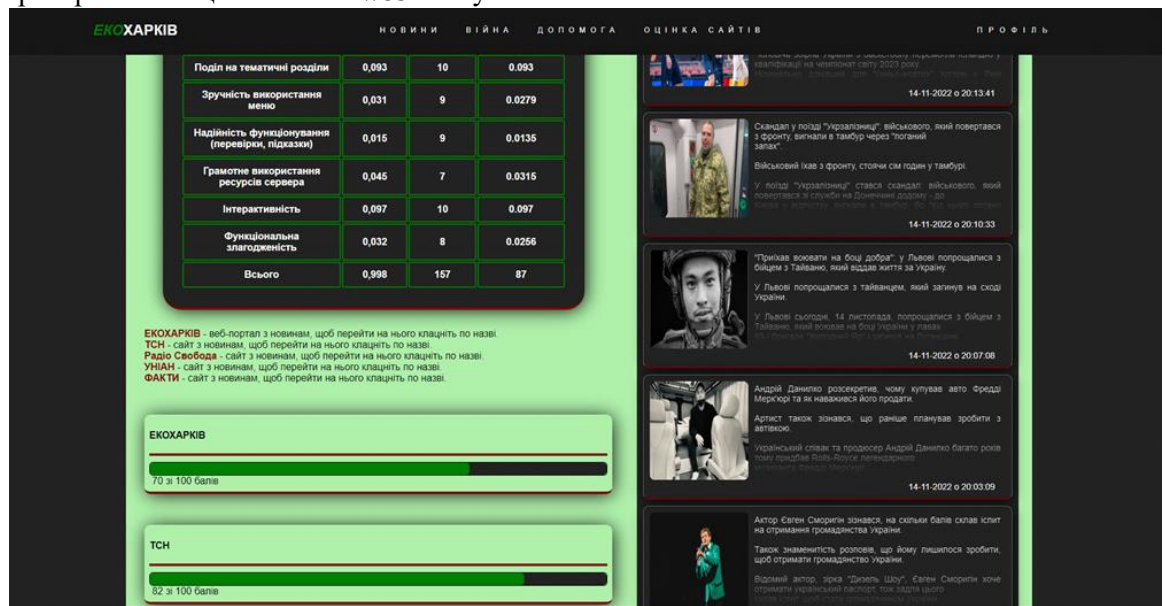


Рис. 13 – Форма для обчислення загальної оцінки якості web-сайту

Розглянуто приклад визначення коефіцієнтів значущості критеріїв якості web-сайту. Для прикладу використання методу оцінки якості web-сайту було розроблено інформаційний web-сайт «ЕКОХАРКІВ». Наведено приклад оцінки якості web-сайту за обраними критеріями.

Список бібліографічного опису

- Digital 2022: global overview report <https://datareportal.com/reports/digital-2022-global-overview-report>.
- Sotnik, S., Shakurova, T., & Lyashenko, V. (2023). Development Features Web-Applications. *International Journal of Academic and Applied Research (IJAAR)*, 7(1), 79-85.
- Гикавчук М.С., Петровський С.С., Скрипник Т.К. (2019) Інформаційна технологія аналізу конкурентоздатності веб-порталів. *Вісник Хмельницького національного університету*. №6 (279). С.120-124. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2019-279-6-120-124>.
- Забарна Е. М., Соловьева Е. Ю. Система та критерії маркетингового аналізу вищих навчальних закладів. *Ефективна економіка*, № 1, 2013. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1748>.
- Василів В. Б., Безтелесна, Л. І. Вебаналітика як засіб оцінювання і формування конкурентних переваг університетів України. *Інформаційні технології і засоби навчання*, 2021. 85(5), 323–343. <https://doi.org/10.33407/itlt.v85i5.3918>.
- Петров Э. Г., Брынза Н. А., Колесник Л. В., Пислакова О.А. Методы и модели принятия решений в условиях многокритериальности и неопределенности. Херсон, 2014. 192 с.
- Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
- Філь, Н.Ю. (2022). Моделі вибору обладнання для автосервісу. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, (47), 48-54. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-47-19>.

References

- Digital 2022: global overview report <https://datareportal.com/reports/digital-2022-global-overview-report>.
- Sotnik, S., Shakurova, T., & Lyashenko, V. (2023). Development Features Web-Applications. *International Journal of Academic and Applied Research (IJAAR)*, 7(1), 79-85.
- Hykavchuk M.S., Petrovsky S.S., Skripnik T.K. (2019) Information technology analysis competitiveness of web portal. *Herald of Khmelnytskyi national university*, Issue 6, (279). P. 120-124. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2019-279-6-120-124>.
- Zabarna E.M., and Solovyova E.Yu, (2013). System and criteria of marketing analysis of higher educational institutions. *Effective economics*, 1, [Online]. Available: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1748>. (in Ukrainian)
- Vasylyiv V. B. and Beztelesna L. I., Web analytics as a means of evaluation and formation of competitive advantages of universities of Ukraine, *ITLT*, vol. 85, no. 5, pp. 323–343, Nov. 2021. <https://doi.org/10.33407/itlt.v85i5.3918>.
- Petrov E. G., Brynza N. A., Kolesnik L. V., Pisklakova O.A. Metody i modeli priniatia reshenii v usloviakh mnogokriterial'nosti i neopredelennosti [Methods and models of decision-making in conditions of multicriteria and uncertainty]. Kherson, 2014. 192 p.
- Saaty T.L.. Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhi [Making decisions. Hierarchy analysis method]. Moscow. Russia: Radio i svjaz', 1993. (In Russian).
- Fil, N. (2022). Models for the selection of car service equipment. *Computer-integrated technologies: education, science, production*, (47), 48-54. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-47-19>.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-14>

УДК 004.42

Христинець Наталія Анатоліївна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-4836-7632>

Лавренчук Світлана Василівна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-5453-3924>

Пех Петро Антонович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-6327-3319>

Євсюк Микола Миколайович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-3768-8959>

Євсюк Володимир Миколайович, бакалавр

Крулік Юрій Олександрович, бакалавр

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ФУНКЦІОНАЛЬНІ АДАПТИВНІ ІНТЕРФЕЙСИ З ДИНАМІЧНИМИ КОМПОНЕНТАМИ ДЛЯ ПІДСИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ МУЛЬТИМЕДІЙНОГО КОНТЕНТУ

Христинець Н.А., Лавренчук С.В., Пех П.А., Євсюк М.М., Євсюк В.М., Крулік Ю.О. Функціональні адаптивні інтерфейси з динамічними компонентами для підсистем зберігання мультимедійного контенту. В статті розглянуто методи і способи побудови інтерфейсів прикладних програм. Досліджено питання багатопоточності і асинхронного програмування, що включає створення та керування потоками для ефективного обробки та аналізу даних. Такий спосіб керування потоками дозволяє контролювати кількість одночасних потоків, які можуть отримати доступ до обмеженого ресурсу даних та забезпечує ефективність цього доступу. Досліджено класичні атрибути валідації, такі як Required, Range, RegularExpression для перевірки вхідних параметрів, моделей або запитів. Створено власний клас, який реалізує інтерфейс IValidator з пакету FluentValidation та розроблено програму для організації валідації у інтерфейсах прикладних програм.

Ключові слова: API, валідація, багатопоточність, атрибути валідації, мультимедійний контент

Khrystynets N., Lavrenchuk S., Pekh P., Yevsyuk M., Yevsyuk V., Krulik Yu. Functional adaptive interfaces with dynamic components for multimedia content storage subsystems. The article discusses methods and ways of building application program interfaces. The issue of multithreading and asynchronous programming, which includes the creation and management of threads for efficient data processing and analysis, is investigated. This method of thread management allows you to control the number of simultaneous threads that can access a limited data resource and ensures the efficiency of this access. Explored classic validation attributes like Required, Range, RegularExpression to validate input parameters, models or queries. A custom class was created that implements the IValidator interface from the FluentValidation package, and a program was developed to organize validation in application program interfaces.

Keywords: API, validation, multithreading, validation attributes, multimedia content

Постановка задачі. У сучасному цифровому світі розробка програмних додатків інтегрується з великою кількістю зовнішніх сервісів, платформ та систем. Інтерфейси прикладних програм (API) виступають, як міст між різними компонентами програмного забезпечення []. Вони використовуються у багатьох сферах індустрії. У веб-розробках інтерфейси прикладних програм є основним способом взаємодії між різними компонентами програмного забезпечення і можуть надавати доступ до функцій, баз даних, зовнішніх сервісів та іншого функціоналу. В системах електронної комерції інтерфейси прикладних програм дозволяють цим системам взаємодіяти між собою, обмінюватися даними та виконувати спільні операції. Це полегшує автоматизацію бізнес-процесів та сприяє ефективному обміну даними між різними системами. У платіжних сервісах - таких, як наприклад, PayPal – пропонується API для прийому платежів та управління фінансовими операціями, для подальшої інтеграції платіжних функцій у додатки та електронні магазини. Популярні платформи соціальних медіа, такі як Facebook, Instagram та інші, також надають API для доступу до своїх послуг. До таких послуг відносяться публікації мультимедійного контенту, отримання даних про користувачів цих мереж, взаємодії з коментарями та багатьох інших функцій.

Метою дослідження є визначення специфікацій створення програмних інтерфейсів для мультимедійного контенту, валідація даних у програмних інтерфейсах та дослідження багатопоточності прикладних програм.

Новизна дослідження полягає у розробці індивідуальних валідаторів та розробці власних алгоритмів поведінки процесів і потоків в проектуванні інтерфейсів прикладних програм.

Основна частина. використовуються для забезпечення взаємодії між компонентами програмного забезпечення, сприяють розширенню функціональності та спрощують інтеграцію між

різними системами (рис. 1). Тому, питання розробки продуктивних API за допомогою сучасних засобів: фреймворків, мов програмування є актуальною задачею.

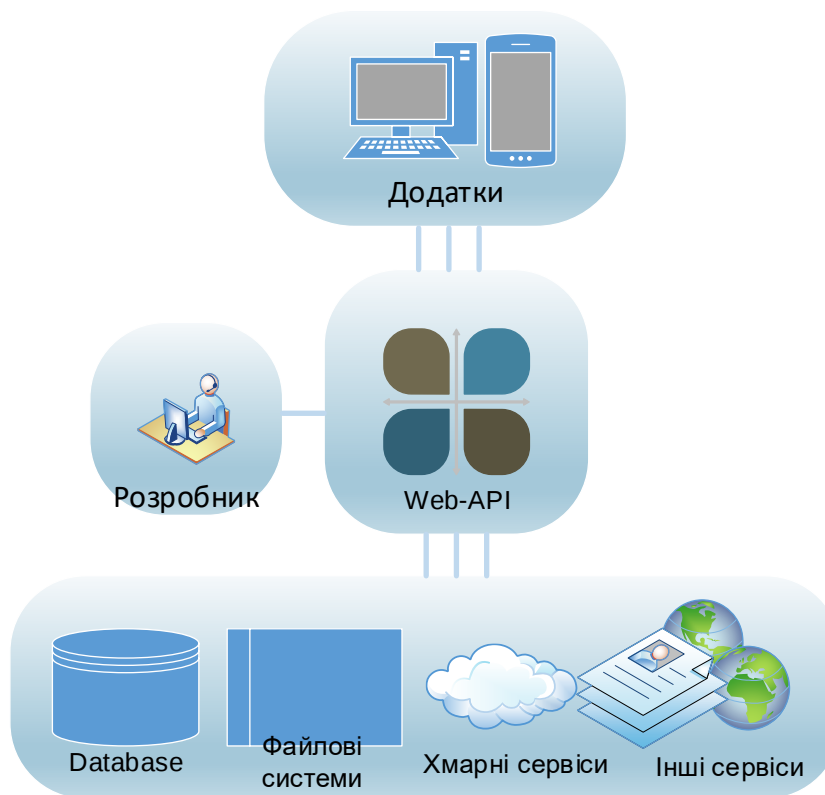


Рис. 1. Взаємодія елементів системи API-інтерфейсів

Створення мультимедійного контенту в веб-інтерфейсах включає в себе використання різноманітних технологій та інструментів для додавання графіки, звуку, відео та іншого мультимедійного вмісту на веб-сторінки. Основні елементи, які ви можете використовувати для створення мультимедійного контенту, включають зображення, аудіо- та відео-елементи, анімацію та відео. Важливим моментом організації ефективного API є багатопоточність, тобто здатність програм обробляти багато потоків одночасно при роботі з мультимедійним контентом [1].

Використання багатопоточності дозволяє програмі виконувати багато завдань паралельно, що може покращити продуктивність і швидкість відгуку програми на користувацькі дії. В роботі будемо акцентувати увагу на елементах розробки веб-API у фреймворку ASP.NET Web API на платформі .NET. Використаємо засоби мови програмування C#, яка надає різні механізми та бібліотеки для роботи з потоками.

Загалом, створення інтерфейсів забезпечується певним алгоритмом. Спочатку іде розробка користувацького інтерфейсу (UI) програми. Вона охоплює створення графічного вигляду програми, розташування елементів керування на формі, обробку подій і взаємодію з користувачем. Для програмування інтерфейсів можуть використовуватись різні інструменти та технології, такі як бібліотеки графічного інтерфейсу користувача (GUI), мови програмування для розробки десктопних або веб-додатків, фреймворки. Важливим моментом організації ефективного API є багатопоточність, тобто здатність програм обробляти багато потоків одночасно. Потік є окремим шляхом виконання програмного коду.

Використання багатопоточності дозволяє програмі виконувати багато завдань паралельно, що може покращити продуктивність і швидкість відгуку програми на користувацькі дії. В роботі будемо акцентувати увагу на елементах розробки веб-API у фреймворку ASP.NET Web API на платформі .NET. Використаємо засоби мови програмування C#, яка надає різні механізми та бібліотеки для роботи з потоками. Ці прості кроки можуть служити вихідною точкою для створення мультимедійного контенту в веб-інтерфейсах.

Специфікації API. Визначення специфікацій та етапи створення веб-API можуть розрізнятися залежно від конкретного проекту та підходу розробки [2]. Однак, є загальні етапи створення веб-API, серед яких: розробка механізмів маршрутизації для визначення шляхів до API та методи обробки запитів до додатку; процес перетворення об'єктів або структур даних в формат, який може бути збережений та переданий через мережу та інші. При проектуванні веб-API важливо враховувати особливості обробки потоків для забезпечення ефективності, масштабованості та безпеки.

На відміну від десктопних API, веб-API мають кілька відмінних рис, оскільки вони спрямовані на різні платформи та середовища. Застосування протоколів HTTP, REST у веб-API використовуються для комунікації між веб-сервером та клієнтськими додатками, а протоколи десктопних API – це, як правило, TCP/IP або named pipes. Особливістю веб-API є і середовище виконання: зазвичай вони виконуються на веб-сервері або в хмарному середовищі і обслуговують багато клієнтів одночасно, а десктопні API виконуються безпосередньо на комп'ютері користувача, часто навіть відокремлено від сервера. Проте, найважливішою особливістю, на нашу думку, є те, що веб-API потребують ретельного розгляду з питань безпеки, оскільки вони працюють в мережі Інтернет і піддаються різним загрозам. Десктопні API також потребують заходів безпеки, але вони працюють у більш контрольованому середовищі, що зменшує загрози безпеки таких API.

В даній роботі детально акцентована увага на ті особливості обробки потоків, які стосуються надійності, безпеки та ефективності веб-API: валідацію даних та організацію різних механізмів багатопотоковості.

Визначення вимог до інтерфейсу. Першим етапом створення інтерфейсів прикладних програм є формування ідеї щодо розробки функціоналу і архітектури додатку, а також підбір фреймворку для подальшої реалізації [3]. На цьому етапі важливо сформулювати уявлення, які дані потрібно буде передавати та отримувати через розроблений інтерфейс. Вхідні дані, які надходять до веб-додатку, повинні бути перевірені на коректність та безпеку перед обробкою.

Важливо врахувати на цьому етапі, які будуть права доступу до API, а також розробити схеми маршрутів, структури даних та об'єктів, які будуть передаватися через API. Це дозволить уникнути вразливостей, таких як SQL-ін'єкції, XSS-атаки та інші види зловмисного впливу на систему.

Правила вдалого керування процесами і потоками. Погане проектування поведінки процесів і потоків може статися у різних ситуаціях. Особливо часто воно виникає в таких випадках [4]:

1) Якщо розробник не має достатнього досвіду або розуміння багатопотоковості. У такому разі є висока імовірність неправильно оцінити взаємодію між потоками і зробити помилки у проектуванні.

2) Використання спільного доступу до ресурсів. Коли кілька потоків мають доступ до спільних ресурсів, таких як змінні, об'єкти або файли, неправильне керування доступом може призвести до ситуацій гонок, коли потоки конфліктують між собою і працюють з непередбачуваними даними.

Нижче поданий фрагмент коду засобами ASP.NET мовою C#, у якому при записі в файл, відсутнє належне керування доступом до файлової системи:

```
public FileManager(string filePath)
{
    _filePath = filePath;
}

public void WriteToFile(string content)
{
    var fileStream = File.OpenWrite(_filePath);
    var writer = new StreamWriter(fileStream);
    writer.Write(content);
    writer.Close();
    fileStream.Close();
}
```

Код відкриває файл для запису, але не використовує механізми синхронізації, щоб уникнути одночасного доступу до файлу з багатьох потоків або процесів. Це може призвести до ситуації, коли кілька потоків або процесів намагаються записати в файл одночасно, що може призвести до конфліктів і некоректного запису даних.

Логіка коду web-API. Усі логічні структурні елементи коду [5], їх призначення та приклади реалізації для створення веб-API подані в таблиці 1:

Таблиця 1 – Систематизація структурних елементів веб-API

Структурний елемент	Призначення	Способи реалізації (приклади)
Routing	Визначення URL та відповідних методів обробки запитів	За допомогою атрибутів маршрутизації [HttpGet], [HttpPost], [HttpPut], [HttpDelete], методів MapRoute або MapGet, MapPost та ін.
Controllers	Контролери приймають запити, обробляють їх і повертають відповіді.	Можна створювати шляхом створення класу, який наслідuje від класу Controller або ApiController
Models	Класи, які представляють дані, що передаються в запиті або повертаються відповіддю.	Моделі визначають структуру і валідацію даних, а також можуть містити логіку для операцій з даними. (Наприклад, у веб-додатку можна створити клас Product, який представляє модель продукту з властивостями Id, Name і Price)
Services	Класи, які містять бізнес-логіку додатку.	Наприклад, можна оголосити інтерфейс IProductService, який визначає методи, необхідні для роботи з продуктами, а потім реалізувати цей інтерфейс в класі ProductService, який отримує залежність IRepository<Product> через конструктор.
Filters	Класи, які застосовуються, щоб виконувати певні перевірки або операції до або після обробки запиту.	Зазвичай використовують такі типи фільтрів: Authorization Filters, Action Filters, Result Filters, Exception Filters
Результати (Results):	Класи, які визначають типи відповідей, що повертаються від методів контролерів.	Результатом обробки може бути JSON-об'єкт, XML-документ, HTML-сторінку або статус коду. Типи результатів: ViewResult, JsonResult, FileResult, RedirectResult, ContentResult та ін.
Configuration	Налаштування та параметризація веб-API.	Файл конфігурації окремо від коду. Наприклад, можна використати файл appsettings.json, який зберігає ключ-значення пари параметрів конфігурації

Подана у таблиці логічна структура веб-API допомагає організувати код будь-якого веб-додатку і визначити, як взаємодіють його різні компоненти. Вона допомагає зрозуміти, як дані перетікають через різні шари архітектури додатку і як вони повинні опрацьовуватись в процесі обробки HTTP-запитів.

Валідація. У ASP.NET Web API можна використовувати класичні атрибути валідації, такі як Required, Range, RegularExpression та інші, для перевірки вхідних параметрів, моделей або запитів на валідність.

Також, можна створити власні правила валідації, які відповідають специфічним потребам додатку. Зокрема, було створено власний клас, який реалізує інтерфейс IValidator (або успадкується від класу AbstractValidator) з пакету FluentValidation. Для валідації об'єктів типу XProject створено валідатор XProjectValidator, який перевіряє, чи поле Name не є пустим і має довжину від 1 до 50 символів, а поле Email є обов'язковим та має коректний формат електронної пошти.

```
public class XProjectValidator : AbstractValidator<XProject>
{
    public XProjectValidator()
    {
        RuleFor(x => x.Name)
            .NotEmpty().WithMessage("Name is required")
            .Length(1, 50).WithMessage("Name must be between 1 and 50 characters");

        RuleFor(x => x.Email)
            .NotEmpty().WithMessage("Email is required")
            .EmailAddress().WithMessage("Email is not valid");
    }
}
```

Розробка індивідуальних валідаторів має ряд переваг. Перше – це гнучкість в плані власних правил валідації, які відповідають специфічним потребам додатку. Друге - це персоналізація повідомлень: власною валідацією можна визначити самостійно прописані повідомлення про помилки, які повертаються клієнту. Ну і найголовніше – контроль над валідацією.

Висновки. ASP.NET надає різні механізми для реалізації багатопоточності, які дозволяють ефективно обробляти багато запитів одночасно. Ці механізми допомагають забезпечити багатопоточну обробку запитів і підвищити продуктивність веб-API, дозволяючи одночасно обробляти багато запитів без блокування основного потоку виконання. Досліджено, що розробка власної валідації може бути вигідною для багатьох веб-додатків, особливо якщо вони мають специфічні вимоги, або потребують гнучкості та контролю над процесом валідації.

Список бібліографічного опису

1. Кривонос, О. М., Кривонос, М. О. (2021). Приклад реалізації задачі з використанням багатопоточності на мові C. Прикладні системи та технології в інформаційному суспільстві, 131-134.
2. Кравченко, С. В. (2023). Аналіз сучасного фреймворка ASP. NET CORE для WEB-додатків..
3. Лавренюк, А. М., Куссіль, Н. М., Шелестов, А. Ю., & Скакун, С. В. (2019). Інформаційні технології (частина I).
4. Малиновський, В. І., Куперштейн, Л. М., & Каплун, В. А. (2022). Аналіз основних інформаційних загроз і впливів у сучасних мікроконтролерних системах (аналітичний огляд). Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, 44(2), 100-113.
5. Романець, А., & Козбур, Г. В. (2022). Безпека соцмережі під час аутентифікації користувача. Матеріали X науково-технічної конференції „Інформаційні моделі, системи та технології” Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 45-45.

References

1. Kryvonos, O. M., Kryvonos, M. O. (2021). An example of problem implementation using multithreading in the C language. Applied systems and technologies in the information society, 131-134.
2. Kravchenko, S. V. (2023). Analysis of the modern ASP framework. NET CORE for web-Applications.
3. Lavrenyuk, A. M., Kussul, N. M., Shelestov, A. Yu., & Skakun, S. V. (2019). Information technologies (part I).
4. Malinovskyi, V. I., Kuperstein, L. M., & Kaplun, V. A. (2022). Analysis of the main information threats and influences in modern microcontroller systems (analytical review). Optical-electronic information and energy technologies, 44(2), 100-113.
5. Romanets, A., & Kozbur, G. V. (2022). Social network security during user authentication. Materials of the X scientific and technical conference "Information models, systems and technologies" of Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, 45-45.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-15>

УДК 53.089.68

Чайковський Сергій Юрійович, старший науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0002-2891-0845>

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, м. Київ, Україна

ЩОДО ПИТАННЯ АКРЕДИТАЦІЇ КАЛІБРУВАЛЬНИХ ТА ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЛАБОРАТОРІЙ: ЗАГАЛЬНИЙ АСПЕКТ

Чайковський С.Ю. Щодо питання акредитації калібрувальних та вимірювальних лабораторій: загальний аспект. У статті розкрито питання акредитації калібрувальних та вимірювальних лабораторій відносно новітніх стандартів технічного регулювання. Сформовано напрямки фундаменталізації сучасної діючої системи технічного регулювання відповідно до норм та правил Європейського Союзу. Окреслено основні законодавчі норми та стандарти які діють на міжнародному рівні. Визначено принципи акредитації калібрувальних та вимірювальних лабораторій відносно етапів здійснення та відповідальних сторін. Відокремлено три основні принципи на яких ґрунтується якість акредитації: спланованість, фінанси та повна залученість учасників. Наголошено на перевагах та необхідності даної процедури та окреслено набір проблематичних зон. Зазначається, що проблеми акредитації лабораторій на території України ґрунтуються не тільки на технічних та наукових засадах, а й на соціально-економічних, вирішення яких повинно базуватися на дієвій системі перевірки кваліфікації, що повною мірою посприє підвищенню рівня якості роботи сучасних лабораторій. Охарактеризовано механізм роботи міжлабораторного порівняння результатів та визначено цілі застосування даного елементу. Підкреслено, що перевірка кваліфікації прямо впливає на якість кінцевих результатів та наголошено, що провайдер перевірки кваліфікації є сполучною ланкою усього процесу, на нього покладено місію забезпечення належних умов для функціонування схеми перевірки кваліфікації. Зазначається, що на сьогодні в Україні діє 5 провайдерів програм перевірки кваліфікації, є 38 акредитованих калібрувальних лабораторій та 728 – випробувальних лабораторій. Визначено перспективи подальших досліджень в основу яких буде покладено розробку єдиної методики перевірки кваліфікації для забезпечення якості отриманих результатів лабораторіями.

Ключові слова: калібрувальна лабораторія, випробувальна лабораторія, стандарт, акредитація, вимірювання, атестація, технічне регулювання.

Tchaikovsky S. Regarding the issue of accreditation of calibration and measurement laboratories: general aspect.

The article discusses the issue of accreditation of calibration and measurement laboratories in relation to the latest standards of technical regulation. The directions of fundamentalization of the current current system of technical regulation in accordance with the norms and rules of the European Union have been formed. The main legal norms and standards operating at the international level are outlined. The principles of accreditation of calibration and measurement laboratories regarding the stages of implementation and responsible parties are defined. Three basic principles are distinguished on which the quality of accreditation is based: planning, finances and full involvement of participants. The advantages and necessity of this procedure are emphasized and a set of problem areas is outlined. It is noted that the problems of accreditation of laboratories on the territory of Ukraine are based not only on technical and scientific principles, but also on socio-economic ones, the solution of which should be based on an effective system of qualification verification, which will fully contribute to the improvement of the quality of work of modern laboratories. The working mechanism of interlaboratory comparison of results is characterized and the goals of application of this element are defined. It is emphasized that the qualification check directly affects the quality of the final results and it is emphasized that the qualification check provider is the connecting link of the whole process, he is entrusted with the mission of ensuring the proper conditions for the functioning of the qualification check scheme. It is noted that 5 providers of qualification verification programs operate in Ukraine today, there are 38 accredited calibration laboratories and 728 testing laboratories. Prospects for further research have been identified, which will be based on the development of a unified qualification verification methodology to ensure the quality of the results obtained by the laboratories.

Key words: calibration laboratory, testing laboratory, standard, accreditation, measurement, certification, technical regulation.

Вступ та постановка проблеми. Прагнення України до інтеграції у світову спільноту вимагає здійснення низки кроків до гармонізації сучасної діючої системи технічного регулювання відповідно до норм та правил Європейського Союзу.

Забезпечення якості та ефективності випробувальних лабораторій є надзвичайно важливим у еру доказової системи становлення. Якість лабораторії можна визначити як точність, надійність і своєчасність результатів випробувань, що включає відповідність звіту його точність та своєчасність. Акредитація лабораторії – це в основному атестація лабораторії третьою стороною, при якій лабораторії наполягають на розробці та зміцненні системи управління якістю, таким чином мінімізуючи ймовірність видачі помилкових звітів, а також забезпечуючи своєчасну відправку звітів, які будуть своєчасно перевірені та сертифіковані акредитуючим органом. Неточні результати, надані лабораторією, можуть призвести до серйозних наслідків, як фінансових так і виробничих.

Акредитація – це процес, за допомогою якого авторитетний орган офіційно визнає лабораторію та персонал, залучений до роботи лабораторії, компетентними для виконання конкретних завдань, і в кожній країні існує лише один визнаний національний орган з акредитації. На території України органом акредитації випробувальних лабораторій є Національне Агентство з Акредитації України (НААУ), а реєстр акредитованих випробувальних лабораторій розміщений на відповідній сторінці Агентства у мережі Інтернет.

Акредитація допомагає запровадити цикл PDCA або загальне управління якістю, що включає планування, виконання, перевірку та дію. У цьому процесі першим кроком є встановлення цілі для покращення (планування якості), реалізація плану (якісні лабораторні процеси та контроль якості), переконання, що план працює за призначенням (оцінка якості та покращення якості), і якщо буде встановлено, що він працює належним чином, а визнання лабораторії акредитованою. Надання актуальних результатів для оцінки акредитації якості змушує персонал лабораторії залишатися в курсі передових технологій, оскільки вони оцінюють ефективність лабораторії для виконання своїх функцій науковим шляхом із залученням кваліфікованого персоналу які несуть відповідальність і підзвітність за метрологічну простежуваність і використання тестів, які дають відтворювані результати, зберігаючи прозорість. Проходження регулярних оцінок підвищує дисципліну персоналу та почуття професіоналізму, а також призводить до надання високоякісних послуг.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підхід наукової спільноти до акредитації вимірювальних та калібрувальних лабораторій формувалася на протязі багатьох років.

Викладений у [1] матеріал надає практичні рекомендації, щодо розроблення власних процедур валідації нестандартизованих методик калібрування засобів вимірювальної техніки.

В.М. Чепела, О.М. Новомодний, І.М. Коржов та О.І. Колбасін [2] навели узагальнені результати перевірки професійного рівня учасників більше ста раундів, участь в яких прийняли участь більше трьохсот п'ятдесяти учасників від більше ніж тридцяти п'яти організацій різної форми власності. Авторами проведено аналіз структури завершених раундів та їх учасників за роками і видами вимірювань.

У [3] проведено аналіз визначень термінів “верифікація”, “валідація” та “метрологічне підтвердження” у різних стандартах та у міжнародних і міждержавних словниках з метрології. Запропоновані процеси верифікації, валідації та метрологічного підтвердження з урахуванням останніх змін у сфері метрології та метрологічної діяльності та кінцевого терміну впровадження стандартів НАТО у сфері розробки та виробництва озброєння та військової техніки.

Є.Т. Володарський, Л.О. Кошева та І.О. Потоцький [4] розглянули методи визначення інтервалів між калібруваннями робочих еталонів та засобів вимірювальної техніки, які застосовуються у випробувальних та калібрувальних лабораторіях, спрямована на забезпечення метрологічної простежуваності, точності та достовірності результатів вимірювань в умовах експлуатації.

Принципи вимірювання у випробувальних лабораторіях у сфері та поза сферою законодавчо регульованої метрології розкрили С. І. Білик та Ю. І. Рудик [5]. Науковцями наголошено, що жодні технічні заходи не зможуть забезпечити виробництво і виключити техногенної аварії. У ході представлених міркувань автори виявили взаємозв'язок між явищами і пояснили їх масштаби і характер взаємодій. Також авторами запропоноване обґрунтування визначення технічного забезпечення для випробування деяких видів продукції.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Sartori S., Pfeifer T., Crossman M., KBr K. canuto, Ferraris, Gallorini M., Moretti Laura, Peisino, Ferrero C., Balsamo A., Pogliano U. [6], GROUP EA-LC, Ferrero C. [7], Karaaoui Abdul, Assaf Nada [8], Makokha Ernest, Ondondo Raphael, Kimani Daniel, Gachuki Thomas, Basiye Frank, Njeru Mercy, Junghae Muthoni, Downer Marie, Umuro Mamo, Mburu Margaret, Mwangi Jane [9], Oliver Anthony [10], Grochau Ines, Leal Dayane, Caten Carla [11], Tanhehco Yvette, Schwartz Joseph [12], Richter Karol, Erard Luc, Ferrero C., Cofrac Gabriel, Crossman Mike [13], Moreno Silva Patricia, Uribe Ardila Alfredo [14], El Marsafawy Hesham, Roy Rumpa, Ali Fahema [15], Caten Carla [16] та інші.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за окресленою тематикою, питання принципів акредитації калібрувальних та вимірювальних лабораторій залишається відкритим та потребує детального опрацювання відносно новітніх стандартів технічного регулювання.

Постановка завдання. Розкрити принципи акредитації калібрувальних та вимірювальних лабораторій відносно новітніх стандартів технічного регулювання.

Викладення основного матеріалу дослідження. Акредитація надає лабораторії повноваження, призначаючи лабораторію як «кваліфіковану та компетентну» для надання послуг у галузі, у якій вона акредитована, тим самим підвищуючи довіру до звітів виданих акредитованою лабораторією.

Як уже згадувалося, кожна країна має єдиний визнаний національний орган з акредитації. На території України це НААУ. НААУ передбачає оцінку третьою стороною технічної компетентності тестування, включаючи медичні та калібрувальні лабораторії, постачальників послуг з тестування кваліфікації та виробників еталонних матеріалів за допомогою акредитації Органу з оцінки відповідності. Золотим стандартом і найбільш визнаним стандартом для акредитації випробувальних і калібрувальних лабораторій, який використовується на даний момент, є ДСТУ ISO/IEC 17025:2019 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій» (ISO/IEC 17025:2019, IDT). Акредитація постачальників перевірки кваліфікації базується на ДСТУ ISO/IEC 17043: 2017 «Оцінка відповідності – Загальні вимоги до перевірки кваліфікації», а виробників стандартних матеріалів – на основі ДСТУ ISO 17034:2020 «Загальні вимоги до компетентності виробників референтних матеріалів» (ISO 17034:2016, IDT) [17, 18, 19]

Процес акредитації має кілька переваг [17], як було зазначено раніше, однак найважливішою з них є переваги для клієнта/клієнтів, які використовують послуги лабораторії. Перевагами можуть бути підвищена довіра клієнтів до звітів про випробування, виданих лабораторією, і це призводить до потенційного зростання бізнесу завдяки підвищенню довіри клієнтів і задоволеності. Для досягнення цієї мети будь-яка лабораторія буде постійно вдосконалювати своє функціонування та обслуговування. Це потребує регулярного зворотного зв'язку від клієнтів щодо їхнього задоволення. Прагнення лабораторіями отримати акредитацію призводять до значного покращення в управлінні різними мережами лабораторій, приділяючи увагу сферам, які потребують покращення, таким як логістична система, навчання техніків і співробітників, технічне обслуговування приладів, а також видача відповідних результатів після застосування кореляції.

Процес акредитації калібрувальних та випробувальних лабораторій є командною роботою, і на етапах планування команди з якості необхідно дотримуватися чинного законодавства та затверджених механізмів. Після завершення планування процес написання стандартних операційних процедур і довідників акредитації вимагає тривалого часу. Однак існують інші проблеми, такі як конкуренція з іншими лабораторіями, які не мають акредитації та не турбуються про якість, постійне покращення часу виконання робіт, відтік персоналу та підвищення кваліфікації персоналу, які потрібно вирішувати, на етапі їх виникнення. Кожен з них може вплинути на якість результатів.

Якість акредитації калібрувальних та випробувальних лабораторій ґрунтується на трьох основних принципах:

- спланованість підготовки – починаючи від якісного планування та впровадження до його оцінки та покращення, команда якості відіграє важливу роль у забезпеченні розуміння всіх кроків для надання звітів про якість клієнтам;
- фінанси – майже всі процеси, спрямовані на забезпечення якості, залежать від фінансових інвестицій (закупівля внутрішньої перевірки якості, реєстрація для зовнішньої схеми забезпечення якості, наймання персоналу, програми постійного вдосконалення тощо);
- повна участь усіх зацікавлених сторін – кожна особа, задіяна в лабораторії, починаючи від відвідувача, який транспортує зразок до лабораторії, до експерта, який формує звіт.

Організація міжлабораторного порівняння результатів (МПР), здійснює виконання та оцінювання вимірювань або випробувань на тих самих або подібних предметах двома чи більше лабораторіями за заздалегідь визначеними умовами.

Типові цілі МПР включають наступні елементи:

- оцінка продуктивності лабораторій для конкретних випробувань або вимірювань і моніторинг постійної роботи лабораторій;
- виявлення проблем у лабораторіях та ініціювання дій щодо покращення, які, наприклад, можуть бути пов'язані з неадекватними процедурами тестування чи вимірювання, ефективністю навчання персоналу та нагляду, або калібруванням обладнання;

- встановлення ефективності та порівнянності методів випробування або вимірювання;
- надання додаткової довіри клієнтам лабораторії;
- виявлення міжлабораторних відмінностей;
- навчання лабораторій-учасників на основі результатів таких порівнянь;
- підтвердження тверджень щодо невизначеності;
- оцінка характеристик ефективності методу – часто описується як спільне випробування;
- присвоєння значень еталонним матеріалам та оцінка їх придатності для використання в конкретних процедурах випробувань або вимірювань;
- підтримка заяв про еквівалентність вимірювань національних метрологічних інститутів через «ключові порівняння» та додаткові порівняння, що проводяться від імені Міжнародного бюро мір і ваг та асоційованих регіональних метрологічних організацій.

Перевірка кваліфікації (ПК) передбачає використання порівнянь МПР для визначення лабораторних характеристик.

Загалом, розробка та експлуатація схем перевірки кваліфікації повинні здійснюватися провайдерами перевірки кваліфікації, які мають компетенцію проводити міжлабораторні порівняння та мають доступ до експертизи з конкретним типом зразків перевірки кваліфікації.

Що стосується персоналу, провайдер перевірки кваліфікації повинен мати управлінський і технічний персонал з необхідними повноваженнями, ресурсами та технічною компетентністю, необхідними для виконання своїх обов'язків. Керівництво провайдера перевірки кваліфікації має визначити мінімальні рівні кваліфікації та досвіду, необхідні для ключових посад у його організації, та забезпечити відповідність цим кваліфікаціям.

Провайдер перевірки кваліфікації повинен забезпечити наявність належних умов для функціонування схеми перевірки кваліфікації, що охоплює приміщення та обладнання для виготовлення предметів для перевірки кваліфікації, обробки, калібрування, тестування, зберігання та відправлення, обробки даних, зв'язку та пошуку матеріалів і записів.

Провайдер перевірки кваліфікації повинен визначити та спланувати ті процеси, які безпосередньо впливають на якість схеми перевірки кваліфікації, і забезпечити їх виконання згідно з установленими процедурами. Провайдер перевірки кваліфікації повинен задокументувати план перед початком схеми перевірки кваліфікації, який стосується цілей, мети та базової конструкції схеми перевірки кваліфікації. Провайдер перевірки кваліфікації повинен надати учасникам належне попереднє повідомлення перед тим, як надсилати елементи перевірки кваліфікації, зазначаючи дату, коли елементи перевірки кваліфікації, ймовірно, прибудуть або будуть відправлені, якщо тільки дизайн схеми перевірки кваліфікації не робить даний факт недоцільним. Провайдер перевірки кваліфікації повинен надати детальні задокументовані інструкції всім учасникам щодо плану та ходу перевірки кваліфікації.

Все обладнання для обробки даних і програмне забезпечення повинні бути перевірені згідно з процедурами перед тим, як вводиться в експлуатацію. Технічне обслуговування комп'ютерної системи повинно включати процес резервного копіювання та план відновлення системи. Результати такого технічного обслуговування та перевірки роботи повинні бути зафіксовані. Результати, отримані від учасників, повинні бути записані та проаналізовані відповідними методами. Повинні бути встановлені та впроваджені процедури для перевірки достовірності введення даних, передачі даних, статистичного аналізу та звітності. Провайдер перевірки кваліфікації повинен використовувати дійсні методи оцінювання, які відповідають меті схеми перевірки кваліфікації. Методи мають бути задокументовані та включати опис основи для оцінювання. Оцінка продуктивності не повинна передаватися субпідрядником.

Звіти про кваліфікаційні перевірки повинні бути чіткими та вичерпними та містити дані, що охоплюють результати всіх учасників разом із зазначенням продуктивності окремих учасників.

Усі методи та матриці в межах сфери акредитації повинні визначатися лабораторіями, а також повинні бути визначені підобласті та забезпечена участь у порівняльних вимірюваннях різних параметрів у підобластях лабораторіями-учасниками.

Технічну компетентність також можна продемонструвати шляхом участі в програмах міжлабораторного порівняння. Тести на кваліфікацію та програми міжлабораторного порівняння є важливими інструментами для органів з акредитації, які дозволяють перевірити кваліфікацію лабораторії, яка бажає бути акредитованою, і оцінити якість її діяльності. Лабораторії, які подають

заявку на акредитацію, повинні здійснювати діяльність відповідно до критеріїв щодо випробувань кваліфікації або міжлабораторних порівнянь.

У процесі прийняття рішення про акредитацію перевіряються та оцінюються випробування на кваліфікацію лабораторій і плани участі в міжлабораторних порівняннях, їх участь і отримані результати. Якщо є невдалі результати лабораторії, коригувальні дії, вжиті лабораторією, розглядаються та оцінюються. Такі варіанти, як застосування різних інтервалів спостереження, можуть бути реалізовані, якщо лабораторія постійно досягає успішних результатів.

Результати схем перевірки кваліфікації корисні як для учасників, так і для органів з акредитації. Однак існують обмеження щодо використання таких результатів для визначення компетентності. Успішне виконання певної схеми перевірки кваліфікації може свідчити про компетентність для певної сфери застосувань, але може не відображати поточну компетентність. Подібним чином, неуспішне виконання певної схеми перевірки кваліфікації може відображати випадкове відхилення від нормального рівня компетентності. Саме з цих причин перевірка кваліфікації не повинна бути єдиним інструментом, який використовують органи з акредитації в своїх процесах акредитації. Для учасників, які повідомляють про незадовільні результати, органи з акредитації повинні мати політику, щоб гарантувати, що учасники досліджують і коментують свою роботу протягом узгодженого періоду часу, а також вживають відповідних коригувальних дій (за необхідності).

Одним із широко використовуваних методів аналізу при вимірюванні ПК є визначення ступеня еквівалентності шляхом обчислення значень нормалізованої помилки для кожної лабораторії-учасника для кожної точки калібрування. Під час аналізу ступеня еквівалентності результати учасників порівнюються з «еталонними значеннями», отриманими з національних метрологічних інститутів або інших надійних джерел. Порівняння враховує різницю між результатами лабораторій і еталонними значеннями, а також невизначеності, пов'язані з обома. Аналіз нормалізованого коефіцієнта похибок розраховується на основі рівняння:

$$E_{\text{норм}} = \frac{|L_{\text{вз}} - R_{\text{кз}}|}{\sqrt{U_{L_{\text{вз}}}^2 + U_{R_{\text{кз}}}^2}}$$

$L_{\text{вз}}$ – це значення виміряне лабораторією;

$U_{L_{\text{вз}}}$ – значення виміряне лабораторією з розширеною невизначеністю;

$R_{\text{кз}}$ – контрольне значення;

$U_{R_{\text{кз}}}$ – контрольне значення з розширеною невизначеністю.

$E_{\text{норм}}$ має бути в діапазоні ± 1 , якщо аналіз виявляє, що $E_{\text{норм}}$ виходить за межі цього діапазону, результати позначаються як незадовільні. Отже, потрібно дослідження результатів і вжиття будь-яких необхідних коригувальних і запобіжних дій.

Результати перевірки кваліфікації, а також інші дії з контролю якості можуть бути використані для демонстрації компетентності. Дані перевірки кваліфікації, які використовуються для підтвердження заяв про компетентність, зазвичай використовуються організаціями разом з іншими доказами, такими як акредитація. Учасники несуть відповідальність за те, щоб вони надали всю необхідну інформацію зацікавленим сторонам, які бажають оцінити учасників щодо їх компетентності.

Результати схем перевірки кваліфікації є корисними для регулюючих органів, яким необхідно оцінити продуктивність учасників, на яких поширюються правила. Це найважливіший параметр, який запитують органи з акредитації під час подання заявки на акредитацію та оцінювачі під час оцінки. Успішні результати ПК необхідні для забезпечення якості отриманих результатів лабораторіями згідно з пунктом 7.7 ДСТУ ISO/IEC 17025:2019. В Україні діє 5 провайдерів програм перевірки кваліфікації. Станом на 07.04.2023 року кількість акредитованих калібрувальних лабораторій у нашій країні становить 38, кількість випробувальних лабораторій – 728, і їх кількість швидко зростає. У цьому дослідженні роль тестів ПК у забезпеченні акредитації лабораторії згадується, як якість вимірювань, що проводяться в лабораторіях, організація випробувань ПК, аналіз і звітність про їх результати, а також роль цих випробувань під час акредитації та перевірок акредитації калібрувальних та вимірювальних лабораторій.

Висновки. У роботі розкрито принципи акредитації калібрувальних та вимірювальних лабораторій відносно новітніх стандартів технічного регулювання. Проблеми акредитації лабораторій на території України ґрунтуються не тільки на технічних та наукових засадах, а й на соціально-економічних, вирішення яких повинно базуватися на дієвій системі перевірки кваліфікації, що повною мірою посприє підвищенню рівня якості роботи сучасних лабораторій. Доведено актуальність застосування власних методів калібрування, розробка яких повинна базуватися на чинних нормах міжнародного технічного регламенту.

Перспективами подальшого дослідження є розробка єдиної методики перевірки кваліфікації для забезпечення якості отриманих результатів лабораторіями.

Список бібліографічного опису

1. Пастущин Л. Б. Валідація не стандартизованих методик калібрування засобів вимірювальної техніки / Перспективні технології та прилади. Луцьк, 2022. № 22. С. 84-89. DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-12
2. Аналіз поточного стану та динаміки робіт калібрувальних лабораторій України / В.М. Чепела, О.М. Новомодний, І.М. Коржов, О.І. Колбасін // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, 2021. № 4(45). С. 143-1541. DOI: 10.30748/nitps.2021.45.18
3. Верифікація, валідація та метрологічне підтвердження засобів вимірювальної техніки для випробувань виробів озброєння та військової техніки / Борщ В., Вервейко О., Семироз А., Аркушенко П., Чеботар В. // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, 2021. № 8(2). С. 10-19. doi: 10.37701/DNDIVSOVT.8.2021.02.
4. Володарський Є.Т., Кошева Л.О., Потоцький І.О. Методи калібрування засобів вимірювальної техніки в умовах експлуатації: монографія/ Є.Т. Володарський, Л.О. Кошева, І.О. Потоцький. Вінниця, 2021. 162 с.
5. Білик С. І., Рудик Ю. І. Вимірювання у випробувальних лабораторіях у сфері та поза сферою законодавчо регульованої метрології: Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю. 2022. С. 396-399.
6. Sartori S., Pfeifer T., Crossman M., KBr K. canuto, Ferraris, Gallorini M., Moretti Laura, Peisino, Ferrero C., Balsamo A., Pogliano U. Coordinate Measuring Machine Calibration EAL European cooperation for Accreditation of Laboratories Publication Reference. 2019.
7. GROUP EA-LC, Ferrero C. European cooperation for Accreditation of Laboratories Publication Reference EAL-G20 Calibration of Stylus Instruments for Measuring Surface Roughness. 2020.
8. Karaoui Abdul, Assaf Nada. Using the SLIPTA checklist to assess laboratory readiness for Joint Commission International accreditation. African Journal of Laboratory Medicine. 2023. № 12. DOI 10.4102/ajlm.v12i1.2044.
9. Makokha Ernest, Ondondo Raphael, Kimani Daniel, Gachuki Thomas, Basiye Frank, Njeru Mercy, Junghae Muthoni, Downer Marie, Umuro Mamo, Mburu Margaret, Mwangi Jane. Enhancing accreditation outcomes for medical laboratories on the Strengthening Laboratory Management Toward Accreditation programme in Kenya via a rapid results initiative. African Journal of Laboratory Medicine. 2022. № 11. DOI 10.4102/ajlm.v11i1.1614.
10. Oliver Anthony. Laboratory Quality Control and Accreditation. 2019. DOI 10.1093/oso/9780198801740.003.0019.
11. Grochau Ines, Leal Dayane, Caten Carla. European current landscape in laboratory accreditation. Accreditation and Quality Assurance. 2020. № 25. DOI 10.1007/s00769-020-01440-w.
12. Tanheco Yvette, Schwartz Joseph. Regulations and Accreditation of Processing Laboratories. 2018. DOI 10.1007/978-3-319-58949-7_2.
13. Richter Karol, Erard Luc, Ferrero C., Cofrac Gabriel, Crossman Mike. Key Criteria used by accreditation bodies to assess Calibration and Testing laboratories Accreditation for assigning quantity values to a Reference Material / Certified Reference Material to the requirements of ISO/IEC 17025. 2021. DOI 10.13140/RG.2.2.11246.33600.
14. Moreno Silva Patricia, Uribe Ardila Alfredo. Accreditation: A challenge for a research laboratory. Molecular Genetics and Metabolism. 2019. P. 126. DOI S102. 10.1016/j.ymgme.2018.12.257.
15. El Marsafawy Hesham, Roy Rumpa, Ali Fahema. Measuring learning outcomes: bridging accreditation requirements and LMS functionalities. Quality Assurance in Education. 2022. № 30. P. 555-570. DOI 10.1108/QAE-11-2021-0186.
16. Caten Carla. Current American landscape in laboratory accreditation according to ISO/IEC 17025. 2020. DOI 10.1007/s00769-017-1248-x".
17. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій// Наказ Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ») від 23 грудня 2019 р. № 483 з 2021–01–01.
18. ДСТУ EN ISO/IEC 17043:2017 Оцінка відповідності. Загальні вимоги до перевірки професійного рівня (EN ISO/IEC 17043:2010; ISO/IEC 17043:2010, IDT) // Наказ Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості»(ДП УкрНДНЦ) від 22.05.2017 р. № 115 з 2018–01–01.
19. ДСТУ ISO 17034:2020 Загальні вимоги до компетентності виробників референтних матеріалів (ISO 17034:2016, IDT) // Наказ Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості»(ДП УкрНДНЦ) від 01.07.2020 № 145 з 2021–09–01.

References

1. Pastushchin L. B. Validation of non-standardized methods of calibration of measuring equipment / Promising technologies and devices. Lutsk, 2022. No. 22. P. 84-89. DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-12

2. Analysis of the current state and dynamics of calibration laboratories of Ukraine / V.M. Chepela, O.M. Novomodnyi, I.M. Korzhov, O.I. Kolbasin // Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine, 2021. No. 4(45). P. 143-1541. DOI: 10.30748/nitps.2021.45.18
3. Verification, validation and metrological confirmation of measuring equipment for testing weapons and military equipment / Borshch V., Verveiko O., Semiroz A., Arkushenko P., Chebotar V. // Collection of scientific works of the State Research Institute of Testing and certification of weapons and military equipment, 2021. No. 8(2). P. 10-19. doi: 10.37701/DNDIVSOVT.8.2021.02.
4. Volodarskyi E.T., Kosheva L.O., Pototskyi I.O. Methods of calibration of measuring equipment under operating conditions: monograph/ E.T. Volodarskyi, L.O. Kosheva, I.O. Pototsky. Vinnytsia, 2021. 162 p.
5. Bilyk S. I., Rudyk Y. I. Measurements in testing laboratories in the sphere and outside the sphere of legally regulated metrology: Actual problems of fire safety and emergency prevention in today's conditions: All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation. 2022. P. 396-399.
6. Sartori S., Pfeifer T., Crossman M., KBr K. canuto, Ferraris, Gallorini M., Moretti Laura, Peisino, Ferrero C., Balsamo A., Pogliano U. Coordinate Measuring Machine Calibration EAL European cooperation for Accreditation of Laboratories Publication Reference. 2019.
7. GROUP EA-LC, Ferrero C. European cooperation for Accreditation of Laboratories Publication Reference EAL-G20 Calibration of Stylus Instruments for Measuring Surface Roughness. 2020.
8. Karaoui Abdul, Assaf Nada. Using the SLIPTA checklist to assess laboratory readiness for Joint Commission International accreditation. African Journal of Laboratory Medicine. 2023. № 12. DOI 10.4102/ajlm.v12i1.2044.
9. Makokha Ernest, Ondondo Raphael, Kimani Daniel, Gachuki Thomas, Basiye Frank, Njeru Mercy, Junghae Muthoni, Downer Marie, Umuro Mamo, Mburu Margaret, Mwangi Jane. Enhancing accreditation outcomes for medical laboratories on the Strengthening Laboratory Management Toward Accreditation programme in Kenya via a rapid results initiative. African Journal of Laboratory Medicine. 2022. № 11. DOI 10.4102/ajlm.v11i1.1614.
10. Oliver Anthony. Laboratory Quality Control and Accreditation. 2019. DOI 10.1093/oso/9780198801740.003.0019.
11. Grochau Ines, Leal Dayane, Caten Carla. European current landscape in laboratory accreditation. Accreditation and Quality Assurance. 2020. № 25. DOI 10.1007/s00769-020-01440-w.
12. Tanheco Yvette, Schwartz Joseph. Regulations and Accreditation of Processing Laboratories. 2018. DOI 10.1007/978-3-319-58949-7_2.
13. Richter Karol, Erard Luc, Ferrero C., Cofrac Gabriel, Crossman Mike. Key Criteria used by accreditation bodies to assess Calibration and Testing laboratories Accreditation for assigning quantity values to a Reference Material / Certified Reference Material to the requirements of ISO/IEC 17025. 2021. DOI 10.13140/RG.2.2.11246.33600.
14. Moreno Silva Patricia, Uribe Ardila Alfredo. Accreditation: A challenge for a research laboratory. Molecular Genetics and Metabolism. 2019. P. 126. DOI S102. 10.1016/j.ymgme.2018.12.257.
15. El Marsafawy Hesham, Roy Rumpa, Ali Fahema. Measuring learning outcomes: bridging accreditation requirements and LMS functionalities. Quality Assurance in Education. 2022. № 30. P. 555-570. DOI 10.1108/QAE-11-2021-0186.
16. Caten Carla. Current American landscape in laboratory accreditation according to ISO/IEC 17025. 2020. DOI 10.1007/s00769-017-1248-x".
17. DSTU EN ISO/IEC 17025:2019 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories// Order of the State Enterprise "Ukrainian Research and Training Center for Problems of Standardization, Certification and Quality" (SE "UkrNDNC") dated December 23, 2019. No. 483 of 2021–01–01.
18. DSTU EN ISO/IEC 17043:2017 Assessment of conformity. General requirements for verification of the professional level (EN ISO/IEC 17043:2010; ISO/IEC 17043:2010, IDT) // Order of the State Enterprise "Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality Problems" (UkrNDNC State Enterprise) dated May 22 .2017 No. 115 of 2018–01–01.
19. DSTU ISO 17034:2020 General requirements for the competence of manufacturers of reference materials (ISO 17034:2016, IDT) // Order of the State Enterprise "Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality Problems" (Ukrainian Research and Development Center for Problems of Standardization, Certification and Quality) dated July 1, 2020 No. 145 of 2021–09–01.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-16>

УДК 330.4:656

Ямковой Марк Вадимович, аспірант

<https://orcid.org/0009-0002-5711-4239>

Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛАНЦЮГА ПОСТАВОК ДЛЯ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У РАМКАХ ЛОГІСТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Ямковой М.В. Математичне моделювання ланцюга поставок для вантажних перевезень у рамках логістичної системи. У статті здійснено математичне моделювання ланцюга поставок для вантажних перевезень у рамках логістичної системи. Підкреслено, що математичне моделювання вантажних потоків у реальному часі потребує великої кількості обчислювальних ресурсів, удосконалення математичних моделей та чисельних методів. Запропоновано метод моделювання проблеми оперативного формування ланцюга поставок для вантажних перевезень у рамках логістичної системи з урахуванням можливості транзиту, проведено огляд обмежень оперативної проблеми вантажоперевезень з можливістю транзиту від клієнта а до клієнта б, що дозволило звести багатопродуктову розподільчу задачу до однопродуктового завдання побудови потоку мінімальної вартості. Запропоновано метод моделювання проблеми оперативного розподілу товарів по логістичним центрам, включаючи систему підтримки прийняття рішення у разі несумісності обмежень проблеми, що виникає. Наголошено, на необхідності апроксимації оперативної проблеми розподілу вантажних перевезень з можливістю транзиту і проблеми розподілу замовлень по логістичним центрам. Зазначається, що обов'язковою є організація системи підтримки прийняття рішення для проблеми оперативного розподілу товарів по логістичним центрам у разі несумісності її обмежень. Розглянуто типову задачу, коли деякий логістичний центр здійснює доставку вантажів клієнтам через проміжні центри, причому кожен із проміжних центрів обслуговує свою групу клієнтів. Наведено формальну постановку задачі та відзначено особливості побудованої задачі, які дозволили побудувати ефективну математичну модель її вирішення у рамках загальної логістичної системи, що сприяло мінімізації часу доставки та підвищення рівня продуктивності постачального підприємства. Особливостями цієї задачі є інтервальний характер обмежень і явно виражена наявність модулів, кожен з яких відповідає за певний блок виконання загальної задачі. Метою подальшого дослідження є побудова ефективного алгоритму розв'язання задачі на основі наведеної математичної моделі та її оптимізаційного аналізу.

Ключові слова: транспортна логістика, система, маршрут, витрати, прибуток, вантаж, перевезення, математична модель.

Yamkovo M. Mathematical modeling of the supply chain for freight transportation within the logistics system. In the article, mathematical modeling of the supply chain for freight transportation within the logistics system is carried out. It is emphasized that mathematical modeling of freight flows in real time requires a large amount of computing resources, improvement of mathematical models and numerical methods. A method of modeling the problem of operational formation of the supply chain for freight transportation within the logistics system taking into account the possibility of transit was proposed, a review of the limitations of the operational problem of freight transportation with the possibility of transit from client a to client b was carried out, which made it possible to reduce the multi-product distribution problem to a single-product task of constructing a minimum cost flow. A method of modeling the problem of operational distribution of goods by logistics centers is proposed, including a decision support system in case of incompatibility of the constraints of the problem that arises. It is emphasized the need to approximate the operational problem of distribution of cargo transportation with the possibility of transit and the problem of distribution of orders by logistics centers. It is noted that it is mandatory to organize a decision support system for the problem of operational distribution of goods across logistics centers in case of incompatibility of its limitations. A typical problem is considered, when a logistics center delivers goods to customers through intermediate centers, and each of the intermediate centers serves its group of customers. The formal statement of the problem is given and the features of the constructed problem are noted, which allowed to build an effective mathematical model of its solution within the framework of the general logistics system, which contributed to minimizing the delivery time and increasing the productivity of the supply company. The features of this task are the interval nature of the restrictions and the clearly expressed presence of modules, each of which is responsible for a specific block of the overall task. The purpose of further research is to build an effective algorithm for solving the problem based on the given mathematical model and its optimization analysis.

Key words: transport logistics, system, route, costs, profit, cargo, transportation, mathematical model.

Вступ та постановка проблеми. Ланцюги поставок, це динамічна і складна система, що включає поведінку кількох учасників. Завдяки реалізації взаємодії між агентами, моделювання реалізується за допомогою інформаційних та матеріальних потоків. Моделювання ланцюга поставок широко застосовується у сфері управління логістичними операціями. Організація ланцюга поставок є корисним інструментом для спостереження продуктивності загальної логістичної системи. Багато моделей використовують моделювання для прогнозування та дизайну відповідного ланцюга поставок для кожного конкретного підприємства. Крім того, моделювання ланцюга поставок використовується для вивчення економічних явищ в динаміці дії логістичної системи на підприємстві.

В умовах сьогодення, принципи моделювання ланцюга поставок в основному зосереджені на покращенні продуктивності, зниженні термінів, підвищенні складності та ефективності управління запасами. Тим не менш, враховуючи перспективні показники результату моделювання ланцюга поставок, є можливість стверджувати, що моделювання може бути впроваджено у сферу планування вантажних перевезень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підхід наукової спільноти до розгляду питань інноваційного розвитку логістичної системи як окремої складової на сучасному підприємстві формувався на протязі багатьох років.

Викладена у [1] економіко-математична модель планів виробництва та доставки продукції промислового підприємства кінцевим споживачам з урахуванням інноваційної та маркетингової активності виробничих підприємств – ланок ланцюга поставок є доволі ефективною. Враховуючи, що за рахунок узгодження виробничих планів промислових підприємств, планів перевезень для транспортних підприємств, а також маркетингових та інноваційних планів є можливість удосконалити взаємодію підприємств у рамках ланцюга поставок.

Н.Г. Бережна [2] підійшла до вирішення науково-прикладної задачі щодо підвищення ефективності та надійності функціонування транспортно-логістичного комплексу (ТЛК) за рахунок проведення моделювання динаміки процесів транспортного обслуговування виробництва, що дозволило узгодити роботу автомобілів та пункту розвантаження і тим самим, забезпечити надійність функціонування логістичної системи на задовільному рівні з найменшими питомими витратами.

Аналізуючи роботу Я. Рахімі [3] варто наголосити на моделі повного логістичного ланцюга постачання у формі вкладеної мережі Петрі, яку представив автор. Зазначено модель, на відміну від відомих, надає змогу відобразити ієрархічність ланцюга, а саме верхній його рівень (фокусну компанію по переробці вихідної сировини) та нижчі рівні, що відображають діяльність постачальників сировини та реалізаторів готової продукції.

У монографії [4] наведено напрямки розвитку теорії логістики та їх практична реалізація на транспорті і у виробництві, зазначено методологію логістичних досліджень систем і процесів, сформульовані методи розв'язання основних проблем і завдань транспортних і виробничих систем. На увагу заслуговують методи кібернетико-логістичного підходу, методи створення і функціонування різних типів логістичних систем, методи оцінки ефективності і прогнозування структур та процесів в них.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Turbaningsih Oktaviani [5], Danchuk Viktor, Comi Antonio, Weiß Christian, Svatko Vitalii [6], Srmbikal Abdulla, Matriano Maria Teresa [7], Moon Kyungduk, Lee Myung Ho, Lee Kangbok [8], Zhang Ling, Cao Feng, Wu Yihan [9], Papaioannou Eleni, Iliopoulou Christina, Kepaptsoglou Konstantinos [10], Liang Zijing [11], Wu Pei-Ju, Chen Mu-Chen, Tsau Chih-Kai [12], Wu Jixiao, Wang Yinghui, Li Wenlu, Wu Haixia [13], Orozonova Azyk, Gapurbaeva Shakhnos, Kydykov Azizbek, Prokopenko Olha, Prause Gunnar, Lytvynenko Sergiy [14] та інші.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за окресленою тематикою, питання розробки дієвої математичної моделі ланцюга поставок для вантажних перевезень у рамках логістичної системи залишається відкритим та потребує детального опрацювання відносно новітніх стандартів технічного регулювання.

Постановка завдання. Запропонувати математичну модель ланцюга поставок для вантажних перевезень у рамках логістичної системи.

Викладення основного матеріалу дослідження. Вантажні агенти взаємодіють один з одним через ланцюг поставок, включаючи інформаційні та матеріальні потоки. Запропонована модель імітує діяльність агентів на всьому ланцюгу поставок враховуючи участь у придбанні продукції, виробництві та розподілу. Дії агентів, у тому числі роздрібною торгівлі, оптовиків, виробників, постачальників та перевізників, ґрунтуються на концепції мінімізації загальних витрат та підвищенні рівня продуктивності виробництва.

Агент прогнозує попит та розглядає відповідні політики управління запасами, виробництво та розподіл продукції. Політики будуть періодично переглядатися відповідно до прогнозування попиту, щоб сформувати дійсний фактичний попит. З попиту кінцевих споживачів, моделюємо кожен день кількість продуктів, які продаються під час роздрібною торгівлі. На підставі фактичного продажу, агент формує рівень запасів наприкінці кожного дня. Потік інформації фіксується, коли

виявлено факт, що рівень запасів досягнув максимальної позиції. Потім агент розміщує замовлення на верхньому рівні ланцюга поставок (відправник вантажу). Після того як відправник вантажу отримав замовлення, потік товару буде запущений; товари завантажуються на вантажівки та передаються замовникам. Під час розподілу продукції, поставки будуть розглядатися відповідно до транспортної політики агента відправника. Потім транспортний агент формує маршрут доставки з мінімізацією часу.



Рис.1 – Структура моделі ланцюга поставок для вантажних перевезень у рамках логістичної системи

Запропонована структура моделі показана на рисунку 1. Агенти сортуються за рівнем відповідно до положення у структурі ланцюга поставок. Наприклад, агент може бути 1 роздрібним; агенти 2 та 3 можуть бути виробником та постачальником відповідно. Для кожного агента, процес прийняття рішення складається з шести модулів для роботи з кожним із напрямків логістичної системи:

- модуль продажів;
- модуль виробництво;
- модуль рішення про купівлю;
- модуль інвентаризації;
- модуль транспортування;
- модуль зворотного зв'язку.

Модуль продажів

Математична модель ґрунтується на наступному: попит на товари кінцевих покупців на підприємстві роздрібної торгівлі слідує закону нормального розподілу. Кількість продажів (d_i^t) кожного продавця i та час t , який, як передбачається слідує нормальному розподілу із середнім значенням продажів $\bar{d}_i$ і стандартного відхилення ε_i моделюється за допомогою концепції Монте-Карло:

$$d_i^t = N(\bar{d}_i, \varepsilon_i) \quad (1)$$

d_i^t – модуль продажу;

i – окремий продавець;

t – час;

$\bar{d}_i$ – середній розподіл продажів;

ε_i – стандартне відхилення.

Для інших агентів, попит залежить від замовлень, отриманих від агентів на нижньому рівні ланцюжка постачання.

© Ямковой М.В.

Модуль виробництво

Кожна фірма приймає рішення щодо регулювання виробництва, формуючи резерв товару, який буде вироблятися протягом місяця. Середньомісячна сума товарів, вироблених кожною фірмою, оцінюється з використанням методів регресії та залежить від характеристик фірм, площі, робітників, тощо:

$$G_i = f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}) \quad (2)$$

де,

G_i – місячний обсяг виробництва товарів фірми i ;

x_{ki} – характеристики / показники фірми i , такі як кількість співробітників, площа, та інші пов'язані атрибути виробництва.

Модуль рішення про покупку

Фірма може придбати товар із багатьох джерел. Модуль прийняття рішення про купівлю визначає частку товарів, які бути придбані з кожного джерела надходжень. Купівельна фракція будується з трьох частин: розподіл вибору каналу, вибір місця розташування та вибір відправника вантажу:

$$P(i) = P(C) \cdot P(\gamma|C) \cdot P(i|C, \gamma), i \in C, \gamma \quad (3)$$

Щоб вибрати тип промисловості, припустимо, що рішення фірми ґрунтується на привабливості кожного типу промисловості. Мультиномінальна модель використовується формування поведінки головних змінних, якими в даному дослідженні виступають обсяг виробництва та кількість фірм цього типу промисловості / виробництва.

$$P(c) = \frac{\exp(V_c)}{\sum_{c' \in \tilde{C}} \exp(V_{c'})} \quad (4)$$

$$V_c = f(x_{1c}, x_{2c}, \dots, x_{kc}) \quad (5)$$

де,

$P(c)$ – частка товару придбана на підприємстві типу C ;

V_c – функція корисності / привабливості типу промисловості.

x_{kc} – атрибути, що становлять привабливість підприємства типу C , такі як загальна сума прибутку від загального обсягу виробництва та числа фірм.

Вибір розташування $P(\gamma|C)$ тобто місце розташування відправників вантажу, які будуть обрані, на основі привабливості зон. Вибір розташування визначається також за допомогою мультиномінальної логістичної моделі. Зональні змінні привабливості (такі як кількість фірм у зоні та рівень загального товарного виробництва в зоні) та зональні змінні опору (наприклад, відстань між зоною замовника та відправника) застосовуються для знаходження рівня привабливості зон:

$$P(\gamma|C) = \frac{\exp(V_\gamma)}{\sum_{\gamma' \in Z} \exp(V_{\gamma'})} \quad (6)$$

$$V_\gamma = f(x_{1\gamma}, x_{2\gamma}, \dots, x_{k\gamma}) \quad (7)$$

де,

$P(\gamma|C)$ – частка товару типу C знаходиться в зоні γ .

V_γ – функція корисності зони γ .

$x_{k\gamma}$ – атрибути, що становлять привабливість зони γ , такі як число фірм в зоні, загальне виробництво товару у зоні, відстань між клієнтами та вантажовідправником.

Вибір вантажовласника $P(i|C, \gamma)$

Аналогічним чином, відправник вантажу використовується для ідентифікації вантажовласника. Процес вибору рішення реалізується з використанням мультиномінальної логістичної моделі в залежності від привабливості відправника вантажу, тобто якості виробництва фірми:

$$P(i|C, \gamma) = \frac{\exp(V_i)}{\sum_{i' \in I} \exp(V_{i'})} \quad (8)$$

$$V_i = f(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}) \quad (9)$$

де,

$P(i|C, \gamma)$ – частка придбаного товару промислового типу C , що знаходить у зоні γ ;

V_i – функція корисності відправника вантажу i .

x_{ki} – атрибути привабливості відправника вантажу, залежать від загального обсягу виробництва.

Модуль інвентаризації

Модуль інвентаризації є головним модулем у вирішенні питання активації інших модулів. Після того, як рівень запасів актуалізує точку замовлення, виробництво та закупівельні модулі активуються на придбання товарів. Аналогічно, коли замовлення розміщується, транспортний модуль запускається на постачання товарів до клієнтів.

Кожна фірма приймає рішення щодо інвентаризації, за для постійного контролю рівня запасів на складі та виробництві. Завдання кожної фірми звести до мінімуму загальні витрати, у тому числі витрати на зберігання, замовлення та транспортні витрати. У реальній ситуації є кілька стратегій, пов'язаних з управлінням запасами і всі вони повинні бути розглянуті в аналізі. Однак, у рамках даного дослідження, передбачається, що порядок інвентаризації кожної фірми є фіксованою частотою. Оптимальна частота замовлення формулюється як:

$$F_{ij} = \sqrt{\frac{Q_{ij}}{\omega \cdot D_{ij}}} \quad (10)$$

де,

F_{ij} – частота замовлення фірми;

Q_{ij} – щомісячний товар куплений фірмою i у фірми j ;

D_{ij} – відстань між фірмою i та фірмою j ;

ω – параметр інвентаризації.

Модуль транспортування

Щоразу, коли інформаційні потоки надходять від клієнтів до відправників вантажу, активується модуль транспортування, щоб розподілити товари від відправників до клієнтів. Модуль транспортування складається з двох модулів: транспортних засобів та маршруту. Коли відправник вантажу доставляє товари для клієнтів, по-перше, він обирає спосіб доставки власноруч або за допомогою експедитора компанії. Після прийняття рішення товари, завантажуються на вантажівки та доставляються до кожного клієнта відповідно до листа маршрутизації транспортного засобу.

Передбачається, що вантажовласник обирає носій та автомобіль враховуючи принцип мінімізації транспортних витрат. Вибір є структурованим у рамках логістичної моделі вибору носія та вибору транспортного засобу. Вибір рішення залежить від характеристик вантажовідправників та клієнтів (наприклад, типу промисловості та чисельності працівників), атрибутів товарів (наприклад, типу товару, розміру партії та частоти відправок) та інших характеристик, пов'язаних із товарами:

$$P_{ij}(LP) = \frac{\exp(V_p)}{1 + \exp(V_B)} \cdot \frac{\exp(V_L + V'_p \cdot \mu_p)}{1 + \exp(V_L + V'_p \cdot \mu_p)} \quad (11)$$

$$V_p = f(Nc_i, Emp_i, L_{ij}, F_{ij}, TT_{ij}) \quad (12)$$

$$V'_p = \ln[\exp(V_p) + \exp(V_B)] \quad (13)$$

де,

$P_{ij}(LP)$ – ймовірність вибору великої приватної вантажівки;

V_p – функція корисності приватної вантажівки;

V_B – функція корисності бізнес вантажівки;

V_L – функція корисності великої вантажівки;

Nc_i – число клієнтів для відправника вантажу i ;

Emp_i – число працівників відправника вантажу i ;

F_{ij} – частота доставки від відправника вантажу i до клієнта j ;

TT_{ij} – час у дорозі від відправника вантажу i до клієнта j ;

μ_p – параметр масштабування для приватної вантажівки.

Автомобіль здійснює рух до клієнтів у відповідності до маршруту. Маршрут доставки зводить до мінімуму загальний час маршруту, який повинен входити у часові рамки максимальних робочих годин водія вантажівки та обмеженої пропускну здатності. Загальний час у дорозі включає час перебування на місці замовника для паркування, завантаження і розвантаження товару. Математична модель може бути записана у вигляді:

Мінімальна

$$TC_i = \sum_{m=1}^n \sum_{l=1}^n ((TT_{l,m} + ST_m) \cdot x_{l,m})$$

З урахуванням

$$\sum_{m=1}^n x_{l,m} = 1 \quad (15)$$

$$\sum_{l=1}^n x_{l,m} = 1 \quad (16)$$

$$\sum_{m=1}^n \sum_{l=1}^n ((TT_{l,m} + ST_m)x_{l,m}) \leq HR_{max} \quad (17)$$

$$\sum_{m=1}^n \sum_{l=1}^n (L_{l,m} \cdot x_{l,m}) \leq WT_{max} \quad (18)$$

$$x_{l,m} \in \{0,1\}$$

де,

TC_i – загальний час доставки вантажу у відповідності з маршрутом;

$TT_{l,m}$ – час у дорозі між клієнтом l і клієнтом m ;

ST_m – час перебування у клієнта m ;

n – кількість клієнтів;

HR_{max} – максимальний робочий час водія;

WT_{max} – максимальна пропускна здатність.

Модуль зворотного зв'язку

Реалізації всіх перерахованих вище стратегій реалізує зворотній зв'язок для агентів. Щоразу, коли фірма отримує замовлення, вони переглядають прогноз попиту та здійснюють рішення про виробництво, закупівлю, інвентаризацію та політику в галузі транспорту. Фірма прогнозує попит із метою перегляду політики інвентаризації. Варто припустити, що фірма використовує середню ковзну як метод прогнозування попиту. Передбачені зміни попиту, частота замовлення також регулюється, щоб задовольнити попит та як наслідок збільшити прибуток та мінімізувати простой.

Висновки. У роботі представлено огляд запропонованої моделі ланцюга поставок для вантажних перевезень на прикладі застосування моделей міського вантажного руху в умовах єдиної логістичної системи. Запропонована модель є системою динамічного моделювання кількох агентів, що систематично включає взаємодію серед вантажних агентів у рамках процесу прийняття рішень. Модель враховує зворотний зв'язок, в якому агент під впливом поведінки інших агентів у ланцюжку поставок формує власну стратегію. Гнучка структура моделювання дозволяє використовувати представлену модель у широкому різноманітті прикладної області. Каркас моделі може бути адаптовано до різних структур ланцюга поставок, які включають набагато більше число залучених агентів. Модель може бути скоригована, щоб задовольнити вимогу транспортних планувальників на складнішому рівні. Крім того, запропонована модель є динамічною системою з урахуванням динаміки поведінки агента перевезення.

Перспективами подальшого дослідження є розробка математичної моделі комбінованої логістичної системи направленої на максимізацію транспортної мережі.

Список бібліографічного опису

1. Постан М. Я. Моделювання ланцюга поставок з урахуванням інноваційної та маркетингової активності виробничих підприємств / Постан М. Я., Куруджи Ю. В. // Економічний вісник НТУУ «КПІ»: збірник наукових праць. № 20. 2021. С. 89-94.
2. Бережна Н.Г. Підвищення ефективності та надійності функціонування транспортно-логістичного комплексу при перевезенні цукрового буряку – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.01 «Транспортні системи» (275 – Транспортні технології (на автомобільному транспорті)). – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка. – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2018. 224 с.
3. Рахімі Я. Нечітка мережева модель та методи інформаційного підтримання повних ланцюгів постачання товарів бакалійної групи. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, 2021. 181 с.
4. Аулін В. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В., Головатий А. О., Голуб Д. В. Теоретичні і методологічні основи логістики транспортних і виробничих систем: монографія під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. – Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2021. 503 с.
5. Turbaningsih Oktaviani. (2022). The study of project cargo logistics operation: a general overview. Journal of Shipping and Trade. 7. 10.1186/s41072-022-00125-6.
6. Danchuk Viktor, Comi Antonio, Weiß Christian, Svatko Vitalii. (2023). The optimization of cargo delivery processes with dynamic route updates in smart logistics. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2. 64-73. 10.15587/1729-4061.2023.277583.
7. Srambikal Abdulla, Matriano Maria Teresa. (2022). An Exploratory Study of the Supply Chain Logistics (SCL) Optimization of SME Cargo Companies. International Journal of Research in Entrepreneurship & Business Studies. 3. 1-10. 10.47259/ijrebs.331.

8. Moon Kyungduk, Lee Myung Ho, Lee Kangbok. (2022). Rescheduling Problem for Heavy Cargo Logistics with Transporters. 10.1007/978-3-031-16407-1_57.
9. Zhang Ling, Cao Feng, Wu Yihan. (2023). Research on the Evolutionary Game Model of Railway Cold Chain Logistics between Cargo Owners and Transport Enterprises. *Mathematical Problems in Engineering*. 2023. 1-12. 10.1155/2023/5606868.
10. Papaioannou Eleni, Iliopoulou Christina, Kepaptsoglou Konstantinos. (2023). Last-Mile Logistics Network Design under E-Cargo Bikes. *Future Transportation*. 3. 403-416. 10.3390/futuretransp3020024.
11. Liang Zijiang. (2019). Design of Automatic Matching System for Ocean-going Cargo in International Logistics. *Journal of Coastal Research*. 93. 1105. 10.2112/SI93-160.1.
12. Wu Pei-Ju, Chen Mu-Chen, Tsau Chih-Kai. (2017). The data-driven analytics for investigating cargo loss in logistics systems. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 47. 68-83. 10.1108/IJPDLM-02-2016-0061.
13. Wu Jixiao, Wang Yinghui, Li Wenlu, Wu Haixia. (2021). Research on Green Transport Mode of Chinese Bulk Cargo Based on Fourth-Party Logistics. *Journal of Advanced Transportation*. 2021. 1-16. 10.1155/2021/6142226.
14. Orozonova Azyk, Gapurbaeva Shakhnos, Kydykov Azizbek, Prokopenko Olha, Prause Gunnar, Lytvynenko Sergiy. (2022). Application of smart logistics technologies in the organization of multimodal cargo delivery. *Transportation Research Procedia*. 63. 1192-1198. 10.1016/j.trpro.2022.06.124.

References

1. Modeling of the supply chain taking into account the innovation and marketing activity of manufacturing enterprises / Postan M. Y., Kurudzy Y. V. // *Economic Bulletin of NTUU "KPI": a collection of scientific papers*. № 20. 2021. С. 89-94.
2. Improving the efficiency and reliability of the transport and logistics complex during the transportation of sugar beet - Qualification scientific work on the rights of a manuscript. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) in specialty 05.22.01 "Transport Systems" (275 - Transport Technologies (in road transport)) - Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Kharkiv National Automobile and Highway University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018. 224 с.
3. Rahimi Y. Fuzzy network model and methods of information support for complete supply chains of grocery group goods. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.13.06 - Information Technology - Cherkasy State Technological University, Cherkasy, 2021. 181 с.
4. Aulin V. V., Hryniv A. V., Lysenko S. V., Holovaty A. O., Holub D. V. Theoretical and methodological foundations of logistics of transport and production systems: monograph edited by Doctor of Technical Sciences, Professor V. V. Aulin - Kropyvnytskyi: Publisher Lysenko V.F., 2021. 503 с.
5. Turbaningsih Oktaviani. (2022). The study of project cargo logistics operation: a general overview. *Journal of Shipping and Trade*. 7. 10.1186/s41072-022-00125-6.
6. Danchuk Viktor, Comi Antonio, Weiß Christian, Svatko Vitalii. (2023). The optimization of cargo delivery processes with dynamic route updates in smart logistics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2. 64-73. 10.15587/1729-4061.2023.277583.
7. Srambikal Abdulla, Matriano Maria Teresa. (2022). An Exploratory Study of the Supply Chain Logistics (SCL) Optimization of SME Cargo Companies. *International Journal of Research in Entrepreneurship & Business Studies*. 3. 1-10. 10.47259/ijrebs.331.
8. Moon Kyungduk, Lee Myung Ho, Lee Kangbok. (2022). Rescheduling Problem for Heavy Cargo Logistics with Transporters. 10.1007/978-3-031-16407-1_57.
9. Zhang Ling, Cao Feng, Wu Yihan. (2023). Research on the Evolutionary Game Model of Railway Cold Chain Logistics between Cargo Owners and Transport Enterprises. *Mathematical Problems in Engineering*. 2023. 1-12. 10.1155/2023/5606868.
10. Papaioannou Eleni, Iliopoulou Christina, Kepaptsoglou Konstantinos. (2023). Last-Mile Logistics Network Design under E-Cargo Bikes. *Future Transportation*. 3. 403-416. 10.3390/futuretransp3020024.
11. Liang Zijiang. (2019). Design of Automatic Matching System for Ocean-going Cargo in International Logistics. *Journal of Coastal Research*. 93. 1105. 10.2112/SI93-160.1.
12. Wu Pei-Ju, Chen Mu-Chen, Tsau Chih-Kai. (2017). The data-driven analytics for investigating cargo loss in logistics systems. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. 47. 68-83. 10.1108/IJPDLM-02-2016-0061.
13. Wu Jixiao, Wang Yinghui, Li Wenlu, Wu Haixia. (2021). Research on Green Transport Mode of Chinese Bulk Cargo Based on Fourth-Party Logistics. *Journal of Advanced Transportation*. 2021. 1-16. 10.1155/2021/6142226.
14. Orozonova Azyk, Gapurbaeva Shakhnos, Kydykov Azizbek, Prokopenko Olha, Prause Gunnar, Lytvynenko Sergiy. (2022). Application of smart logistics technologies in the organization of multimodal cargo delivery. *Transportation Research Procedia*. 63. 1192-1198. 10.1016/j.trpro.2022.06.124.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-17>

УДК 621.396

Беляков Роберт Олегович, к.т.н., доцент, докторант

<https://orcid.org/0000-0001-9882-3088>

Фесенко Олексій Дмитрович, викладач

<https://orcid.org/0000-0002-2114-5327>

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, м. Київ, Україна

МОДЕЛЬ МОБІЛЬНОСТІ НАЗЕМНОЇ КОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Беляков Р.О., Фесенко О.Д. Модель мобільності наземної комунікаційної мережі спеціального призначення.

Проведено аналіз існуючих моделей мобільності вузлів наземних комунікаційних мереж типу Ad-Hoc. У статті показано, що застосування існуючих моделей мобільності для опису наземної радіомережі спеціального призначення не враховує особливості функціонування в різних географічних районах із певними особливостями рельєфу. Встановлено, що перешкоди на місцевості, непрохідні, заміновані райони, інші особливості поля бою можуть впливати на фізичну швидкість та напрям руху наземних комунікаційних вузлів, а в результаті прогнозування – оцінку метрик маршрутизації (відстаней до сусідніх вузлів, географічних координат тощо). Для врахування фізичної швидкості пропонується застосовувати розроблений коефіцієнт маневреності, а для визначення зон функціонування – ранги мобільних користувачів. Управління положенням мобільних базових станцій пропонується здійснювати у відповідності до цільових функцій управління наземною комунікаційною мережею в автоматичному режимі за децентралізованим принципом. Застосування розробленої моделі прогнозовано зменшить обсяг службової інформації про стан мережі та дозволить підвищити ефективність інформаційного обміну.

Ключові слова: модель мобільності, наземна комунікаційна мережа, мобільна базова станція, мобільний користувач, фізична швидкість, система управління, прогнозування.

Bieliakov R., Fesenko O. Mobility model of a special purpose terrestrial communication network. An analysis of the existing models of the mobility of nodes of terrestrial communication networks of the Ad-Hoc type was carried out. The article shows that the use of existing mobility models for the description of a special purpose terrestrial radio network does not take into account the peculiarities of functioning in different geographical areas with certain features of the terrain. It has been established that obstacles on the terrain, impassable, mined areas, other features of the battlefield can affect the physical speed and direction of movement of ground communication nodes, and as a result of forecasting, the estimation of routing metrics (distances to neighboring nodes, geographic coordinates, etc.). To take into account the physical speed, it is proposed to use the developed coefficient of maneuverability, and to determine the functioning zones - the ranks of mobile users. Management of the position of mobile base stations is proposed to be carried out in accordance with the target functions of managing the terrestrial communication network in automatic mode according to the decentralized principle. Application of the developed model is predicted to reduce the amount of service information about the state of the network and increase the efficiency of information exchange.

Keywords: mobility model, terrestrial communication network, mobile base station, mobile user, physical speed, control system, forecasting.

Постановка наукового завдання.

При імітаційному моделюванні процесів інформаційного обміну в комунікаційних мережах класу MANET (рис. 1), одним із найважливіших етапів є вибір серед існуючих, адаптація їх до конкретних умов функціонування або розробка нових моделей мобільності (ММ).

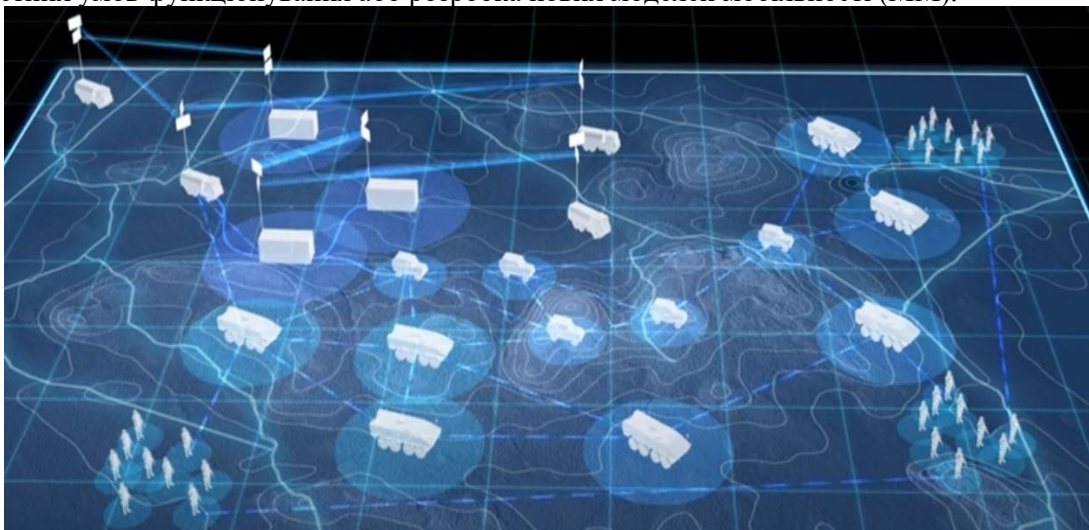


Рис. 1 – Варіант застосування Software Defined Radio в мережах класу MANET [1]

Під мобільністю вузлів Ad-Нос мереж потрібно розуміти випадковий характер їх руху (напрямки, величини фізичної швидкості та прискорення, періодичність, зони типового переміщення), рівень автономності вузлів (переміщення самостійно або в складі групи), час зупинок тощо.

У зв'язку із тим, що першим етапом процесу управління мобільною комунікаційною мережею є збір та в подальшому оновлення інформації про місцезнаходження мобільних користувачів, для імітаційного моделювання процесів інформаційного обміну необхідно здійснити адекватне представлення ММ. Це дозволяє: по-перше, максимально точно сформулювати вихідні дані – метрики позиціонування, необхідні для дослідження процесів маршрутизації в Ad-Нос мережах; по-друге, дозволить здійснювати прогноз якості інформаційного обміну, та управління маршрутизацією в умовах типових сценаріїв переміщення мобільних користувачів.

Таким чином, **актуальним** є завдання розробки нової моделі мобільності наземної комунікаційної мережі спеціального (військового призначення) для забезпечення заданої якості інформаційного обміну з урахуванням рельєфу місцевості.

Метою статті є розробка моделі мобільності вузлів наземних комунікаційних мереж спеціального (військового) призначення.

Об'єктом дослідження є процеси переміщення та інформаційного обміну в наземних комунікаційних мережах спеціального (військового призначення). Відповідно, **предметом дослідження** є моделі мобільності комунікаційних вузлів наземних комунікаційних мереж військового призначення.

Основними завданнями статті є наступні:

1. Аналіз існуючих моделей мобільності вузлів наземних комунікаційних мереж типу Ad-Нос.
2. Дослідження особливостей застосування існуючих ММ для опису наземної радіомережі спеціального призначення.
3. Формалізація запропонованої моделі мобільності вузлів наземних комунікаційних мереж спеціального (військового призначення).

Аналіз останніх публікацій. Більшість проаналізованих наукових праць із предметної області були спрямовані на вирішення задач оновлення даних про місцезнаходження мобільних вузлів. Наприклад в мережі Personal Communication System – PCS [2], оновлення місцезнаходження повинно виконуватися кожного разу, коли мобільний користувач переходить до іншої зони мережі. Коли є необхідність передачі даних, мережа спрямовує пакети до останнього відомого місцезнаходження мобільного користувача. Проте, з урахуванням фізичного середовища інформаційного обміну, стохастичного характеру руху мобільних користувачів, необхідно забезпечити процес прогнозування для оновлення даних про місцезнаходження [3-6]. Ці роботи мають недоліки, які пояснюються наступним чином:

Зазвичай [7, 8] моделі прогнозування ґрунтуються на розподілі ймовірностей швидкості та напрямку мобільного користувача. Для збору такої інформації зазвичай застосовуються модулі Global Position System (GPS).

Більшість методів, досліджуваних у цих роботах, дуже чутливі до змін шляху мобільного користувача, що водночас знижує точність прогнозування у випадку підвищення рівня шумів каналу приймач GPS – Satellite. Ці методи не розрізняють випадковий і регулярний характер зміни даних про фактичне місцезнаходження мобільних користувачів. Загальна ідея методу [9] полягає в розрізненні регулярних і випадкових складових руху користувача.

В загальному випадку, реальні моделі мобільності користувачів для побудови Ad-hoc однорангових мереж дуже складні, і потребують детального об'єктно-орієнтованого опису. Тому виникає необхідність розробки нової моделі мобільності, яка дозволить описати множину типових станів мобільних користувачів наземних комунікаційних мереж військового призначення з урахуванням наявних ресурсів та умов функціонування.

Постановка задачі. Розглядається наземна комунікаційна мережа (НМ) спеціального (військового призначення) значної розмірності (десятки, сотні мобільних вузлів), які випадково розташовані на заданій території, і функціонують при відсутності будь-якої комунікаційної інфраструктури загального користування. Кожен наземний комунікаційний вузол (НКВ) описується як об'єкт, що має: певний тип носія (людина – мобільний користувач (МК), транспортна платформа – мобільна базова станція (МБС)), батарея, процесор, пам'ять, прийомо-передавач, антена, система позиціонування, систему управління (СУ).

В процесі функціонування МК змінює своє місцезнаходження та здійснює інформаційний обмін заданого типу трафіка.

СУ мобільних користувачів, реалізують процес збору даних власного стану (місцезнаходження, каналної пропускної здатності, часу затримки доставки повідомлень тощо), з метою формування управляючих впливів СУ мобільних базових станцій для забезпечення функціонування НМ в динамічних умовах із заданим рівнем якості.

Існуюча система управління МБС на транспортних платформах забезпечує прогнозування стану наземної комунікаційної мережі в зоні радіозв'язності МБС та формує управляючі рішення щодо зміни місця розташування і оптимізації використання мережевих і каналних ресурсів (рис. 1), проте на сьогоднішній день відсутні механізми управління МБС з урахуванням реальної фізичної швидкості з урахуванням рельєфу.

Таким чином, виконання функцій, що класично виконуються посадовими особами центру управління мережею (ЦУМ) пропонується здійснювати в автоматичному режимі в реальному часі з урахуванням рельєфу місцевості та динамічної топології за рахунок систем управління МБС (самостійно приймати рішення по кластеризації, маршрутам переміщення, розподілу ресурсів тощо), та реалізувати принцип децентралізації управління НМ (в умовах відсутності зв'язності з наземним центром управління мережею).

Задано:

- площа розташування вузлів НМ – $\Theta_{\text{НМ}}$; кількість вузлів мережі $N_{\text{НМ}}$, координати розміщення з урахуванням рельєфу (x_i, y_i, z_i) i -ого вузла мережі; $O_i^{\text{НМ}}(t)$ – об'єм інформації i -го вузла комунікаційної наземної мережі;

- технічні характеристики вузла – тип носія комунікаційних засобів, ємність батареї, витрати енергії на одиницю переміщення (для МБС на транспортних платформах) тощо;

- комунікаційні характеристики вузла НМ – параметри антенних пристроїв, прийомо-передавача, витрати енергії на біт прийому та передачі даних для обраного MAC-протоколу та типу обладнання, протокол маршрутизації каналного рівня тощо;

- характеристики мобільності – швидкість, висота, час функціонування, прискорення та ін.

Обмеження та вимоги:

- площа переміщення мобільних вузлів від задач підрозділу в якому реалізується процес інформаційного обміну;

- інформація про параметри стану вузлів (координати розміщення, рівень енергії батарей, об'єм даних) збирається при первинному обміні hello-пакетами, та оновлюється згідно алгоритму вибраного протоколу каналного рівня;

- наземні комунікаційні вузли мають радіозасоби з однаковим MAC-протоколом, який дозволяє змінювати швидкість передачі даних в залежності від співвідношення сигнал/шум ("дальності радіоканалу") та регулювати потужність передачі (витрати енергії на передачу) [14], наприклад, IEEE 802.11;

- значення енергії батареї вузлів НМ достатній на час моделювання.

Необхідно: розробити модель мобільності наземної комунікаційної мережі з урахуванням фізичної швидкості наземних вузлів, що забезпечить виконання функцій управління [10] в автоматичному режимі.

Аналіз існуючих моделей мобільності.

Random Waypoint Mobility Model (RWMM) – модель мобільності випадкового шляху точки. Така модель мобільності [9] описує випадковий характер переміщення мобільного користувача (вузла наземної комунікаційної мережі) на заданій площині (рис. 2).

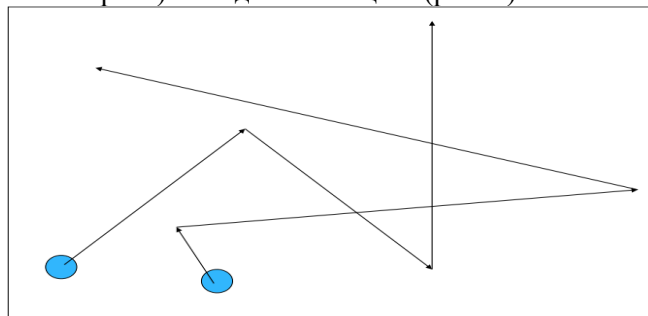


Рис. 2 – Random Waypoint Mobility Model (RWMM)

Відповідно до концепту така модель відображає переміщення вузлів обираючи напрям переміщення та швидкість, вибрану із діапазону $[0, v_{\max}]$ для переміщення до деякої точки заданої площі – пункту призначення. Після досягнення пункту призначення вузол зупиняється на деякий час, що визначається параметром T_{stop} – час паузи. Ця процедура повторюється до завершення моделювання.

Random Walk Model (RWK) – модель випадкового блукання. Така модель є подібна до RWMM, але по-перше, представляє рух вузлів що змінюють свою швидкість/напрямок з інтервалом моделювання - T_{slot} . По-друге, новий напрямок вектору швидкості вибирається випадковим чином між $(0, 2\pi]$. Крім того, швидкість оновлюється за рівномірним (Гаусовським) розподілом. Коли вузол досягає межі заданої області, повертається назад (рис. 3).

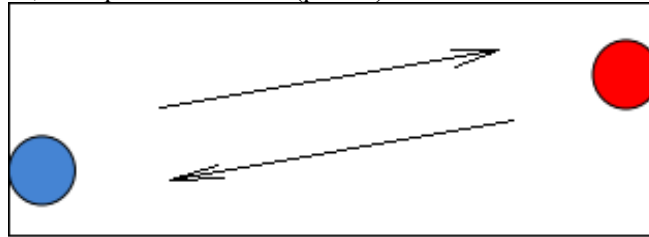


Рис. 3 – Random Walk Mobility Model (RWM)

Reference Point Group Mobility Model (RPGM) – модель групової мобільності контрольної точки (RPGM) [13-15]. В такій моделі (рис. 4) сусідні вузли об'єднуються в групи, а її умовний центральний або реальний центральний вузол –лідер групи, визначає напрям групового руху. Рух лідера відбувається за випадковою точкою шляху. Члени групи сліdkують за напрямком і швидкістю руху лідера і пересуваються поруч із деяким відхиленням напрямку і швидкості але в межах деякого групового радіусу. Формально, вектор руху вузла i в час t , V_i^t може бути описаний як:

$$V_i^t = V_{group}^t + RM_i^t. \quad (1)$$

З рівняння (1), вектор руху RM_i^t є випадковим вектором вузла i , який відхиляється від своєї власної опорної точки. Вектор RM_i^t є незалежним, однаково розподіленим випадковим процесом, довжина якого рівномірно розподілена в інтервалі $[0, r_{\max}]$, де $r_{\max}$ - це максимальна відстань від опорної точки) і чий напрямок рівномірно розподілений в інтервалі $[0, 2\pi]$. Така модель найчастіше застосовується для опису руху бригад рятувальників або військових підрозділів рівня відділення/взвод.

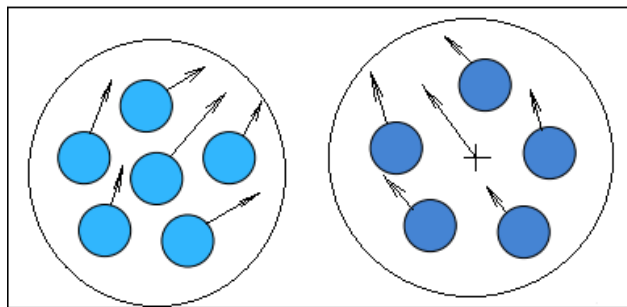


Рис. 4 – Random Walk Mobility Model (RWM)

Агентство перспективних оборонних досліджень Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) класифікувало рухову поведінку вузлів для моделювання військових операцій та дій рятувальників на три категорії на основі RPGM [9]:

1. Модель мобільності на місці: уся площа поділена на кілька суміжних районів. Кожен район займає виключно одна група. Наприклад, при штурмових діях в будинку, або у заданому квадраті.
2. Накладання груп мобільності: різні групи з різними завданнями переміщуються в одному полі накладаючись. Наприклад, дії різнорідних підрозділів в межах одного району.
3. Конвенційна модель мобільності: імітується поведінка мобільності в декількох районах, а деякі групи можуть переміщуватись між ними.

Однак модель RPGM має недоліки: По-перше, він повинен знати повну інформацію про склад групи, мету, швидкості вузлів тощо. У реальних умовах це суттєво збільшує кількість службової інформації. По-друге, місцезнаходження кожного мобільного вузла визначається своїми фізичними координатами. Враховуючи високу динаміку зміни топології мережі мобільних користувачів (високі

швидкості та прискорення, час зупинок реальних носіїв радіозасобів для виконання завдань), розрізнити шаблони руху групи вузлів стає дуже складним завданням. Тому застосування RPGM для імітаційного моделювання в реалістичних середовищах не доцільно і потребує удосконалення.

Reference Velocity Group Mobility Model (RVGM) – модель еталонної швидкісної групової мобільності описана в [12, 13] є розширеною моделлю RPGM, в якій запропоновано використовувати швидкість руху, як основну метрику переміщення групи мобільності та мобільних вузлів. Рух вузла виражається вектором швидкості

$$V = (V_x, V_y)^T,$$

де V_x та V_y позначають компоненти швидкості по осі x та y відповідно.

У моделі RVGM, вектор швидкості i -го вузла в j -й групі має вигляд:

$$V_{i,j}(t) = W_{i,j}(t) + U_{i,j}(t) \quad (2)$$

де $W_{i,j}(t)$ і $U_{i,j}(t)$ – групова швидкість і локальна швидкість векторів відхилення вузла відповідно. Модель мобільності на основі векторів швидкості усуває недоліки моделі RPGM, і спрощує адаптацію до зміни топології мережі. Це пояснюється не врахуванням географічних координат в RPGM. Натомість, в моделі RVGM, враховуються географічні координати для опису швидкості переміщення вузлів. Вона дозволяє описувати рух кожного вузла з випадковою початковою швидкістю та напрямком, але з певними обмеженнями на максимальну швидкість і мінімальний час переміщення між двома точками.

Так, RVGM не враховує ефект від рельєфу місцевості, тобто фізичну швидкість (можуть з'явитися перешкоди на місцевості, непрохідні, заміновані райони, інші особливості поля бою). На рисунку 5 зображено 3D модель рельєфу місцевості побудована у інтерактивному середовищі Wolfram розміром 3*5 км із перепадом по висоті в 300 метрів.

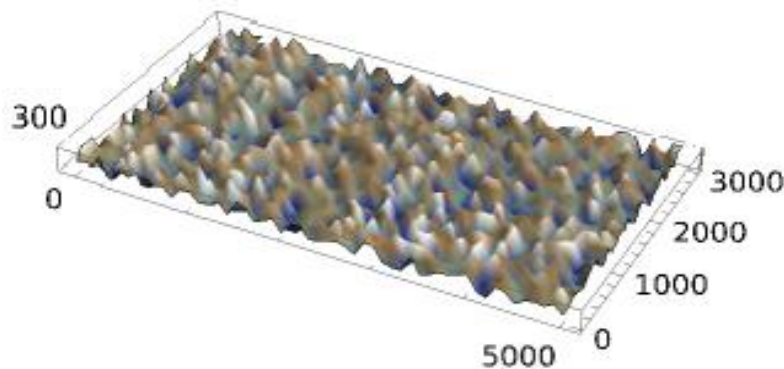


Рис. 5 – 3D-модель довільної ділянки місцевості

Разом з тим імітаційне моделювання вузлів у двовимірному просторі може суттєво впливати на процес передачі даних, через відсутність можливості правильного вибору фізичних параметрів радіопристроїв, вибору оптимального маршруту, фізичну дальність до сусідніх вузлів, відсутність прямої видимості (рис. 6) тощо.

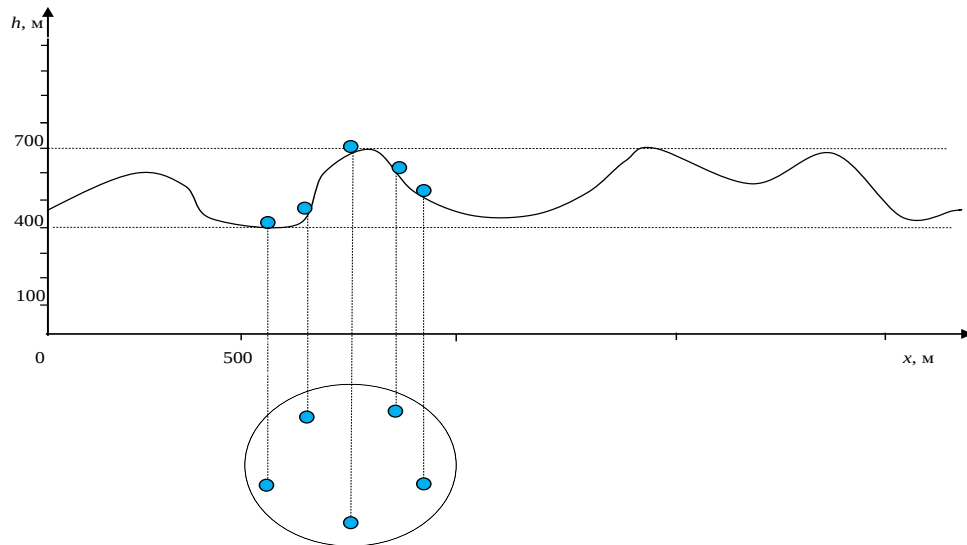


Рис. 6 – Проекція прямокутних координат вузлів (мобільних користувачів) на профіль довільного маршруту 3D ділянки місцевості

Аналіз існуючих моделей показав, що проаналізовані моделі мобільності не враховують особливості функціонування в умовах динамічної топології, а саме вплив рельєфу місцевості на мобільність вузлів (характер зміни напрямку і швидкості руху). Це може призвести до обміну хибними метриками маршрутизації (відстані до сусідніх вузлів, або помилковими координатами місцезнаходження вузлів тощо), і як наслідок, втрати пакетів.

Розробка моделі мобільності наземної комунікаційної мережі

Для усунення недоліків метою узагальнення залежності фізичної швидкості від фізичних перешкод на шляху мобільного користувача, і опису швидкості в 3D просторі, пропонується:

- Ввести поняття *коефіцієнта маневреності* K_{man} . Цей коефіцієнт визначає на скільки змінюється швидкість вузла в залежності від типу і розміру перешкоди. Наприклад, якщо вузол зіткнувся з горою або будівлею, його швидкість може знизитися аж до зупинки, а маршрут відхилитись на величину радіусу перешкоди, з метою її огинання.

Введення коефіцієнта маневреності K_{man} може бути реалізовано через модифікацію швидкості вузла в залежності від перешкоди. Це може бути виражено наступною формулою:

$$V_{i,j}(t+1) = V_{i,j}(t) \cdot (1 - K_{man} \cdot E_{obstacle}),$$

де $V_{i,j}(t+1)$ – оновлена швидкість $V_{i,j}(t)$ i -го вузла j -ої групи після зіткнення із перешкодою, K_{man} – коефіцієнт маневреності, який визначає ступінь зменшення швидкості вузла, $E_{obstacle}$ – функція, яка визначає вплив перешкоди на швидкість вузла. Ця функція може бути визначена в залежності від типу і розміру перешкоди, типу носія радіозасобу (мобільний користувач, мобільна базова станція).

- Врахування швидкості в 3D просторі.* Рух наземних комунікаційних вузлів представлено як вектор швидкості $V = (v_x, v_y, v_z)$, де v_x , v_y і v_z – це компоненти швидкості вздовж осей x , y і z відповідно.

The Range Zone Random Velocity Point Model (RZRVP).

Наземна комунікаційна мережа спеціального (військового призначення), складається із деякої кількості N_{HM} наземних комунікаційних вузлів, N_{MBC} – кількість мобільних базових станцій, N_{MK} – кількість мобільних користувачів, $N_{MBC}, N_{MK} \in N_{HM}$.

ЗОНИ ПЕРЕМІЩЕННЯ МОБІЛЬНИХ КОРИСТУВАЧІВ. МОДЕЛЬ МОБІЛЬНОСТІ RZRVP

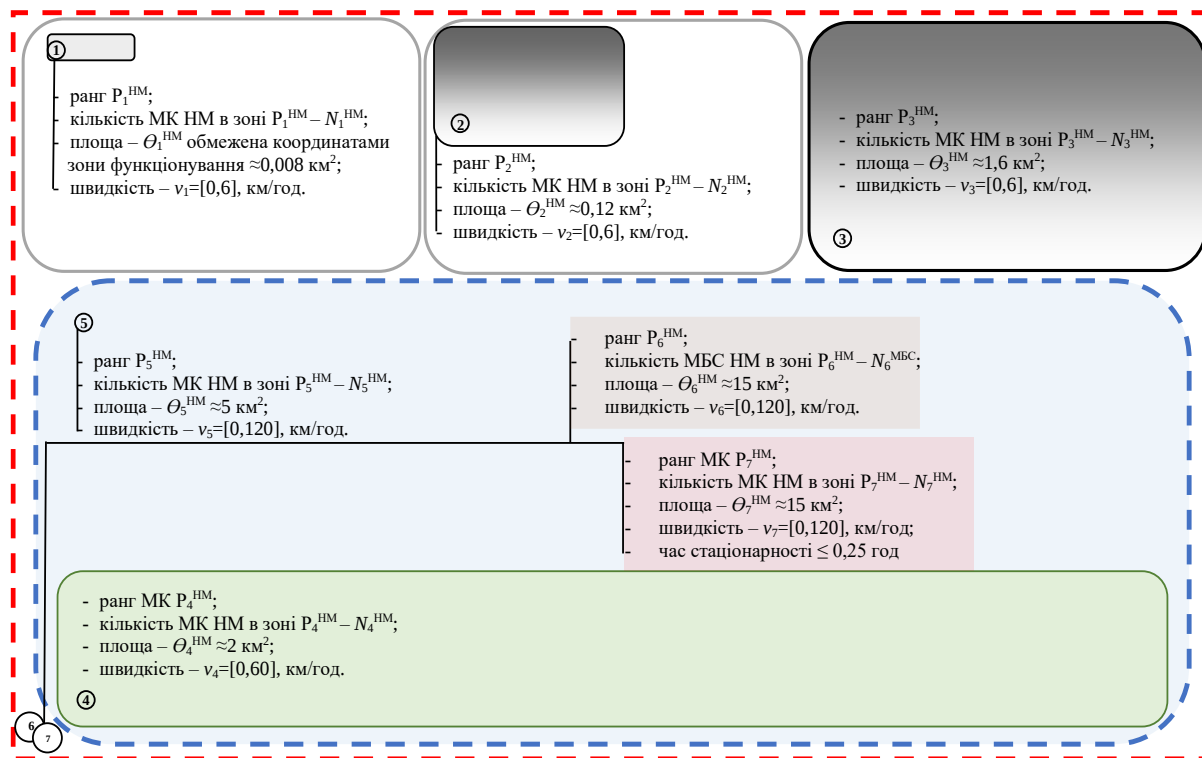


Рис. 7 – Модель мобільності Range Zone Random Velocity Point (RZRVP)

Під мобільними користувачами далі розуміємо множину мобільних вузлів із переносними радіозасобами, що виконують бойові дії та інші спеціальні завдання відповідно до умов обстановки та покладених на них завдань; під мобільними базовими станціями – апаратні, оснащені комунікаційними засобами, розміщення яких вибирається відповідно до множини управляючих впливів від системи управління (СУ) наземною мережею, для виконання вимог із забезпечення радіопокриття мобільних користувачів, пропускної здатності, часу затримки тощо.

Наземні комунікаційні вузли пропонується поділяти за рангом P_i^{HM} , для військових, наприклад $i = \overline{1,7}$, 1 – командири рівня відділення, 2 – взводу, 3 – роти, 4 – керівний склад підрозділів забезпечення, 5 – батальйону; 6 – мобільні базові станції; 7 – штатні/придані артилерія та/або танкові підрозділи. Наземні вузли N_{HKV} розміщені на до вільній території $\Theta_{HM}, \text{м}^2$, що відповідає площі виконання завдань підрозділу.

Мобільні користувачі (МК) переміщуються на обмеженій площі Θ_i^{HM} , відповідно до функціональних обов'язків за своїм рангом, із випадковими напрямками в інтервалі $[0, 2\pi]$, та випадковими швидкостями із інтервалу $[v_{min}^{HMi}, v_{max}^{HMi}]$.

Координати визначеного географічного району місцевості – є геометричними вершинами зони функціонування, наприклад, для зони i -го рангу P_i^{HM} вершини:

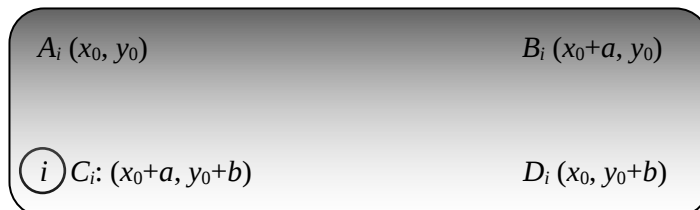


Рис. 8 – Порядок визначення координат зони i -го рангу P_i^{HM}

Через сферичну форму Землі таке представлення є прийнятним для ділянок не великої площі.

На рисунку 9 показано проекцію терену - синтетично згенерованої ділянки місцевості із довільним рельєфом (за допомогою шуму Перліна); зображено наземні комунікаційні вузли кожного із рангів із власними характеристиками що переміщуються по поверхні із урахуванням коефіцієнта маневреності описаного вище.

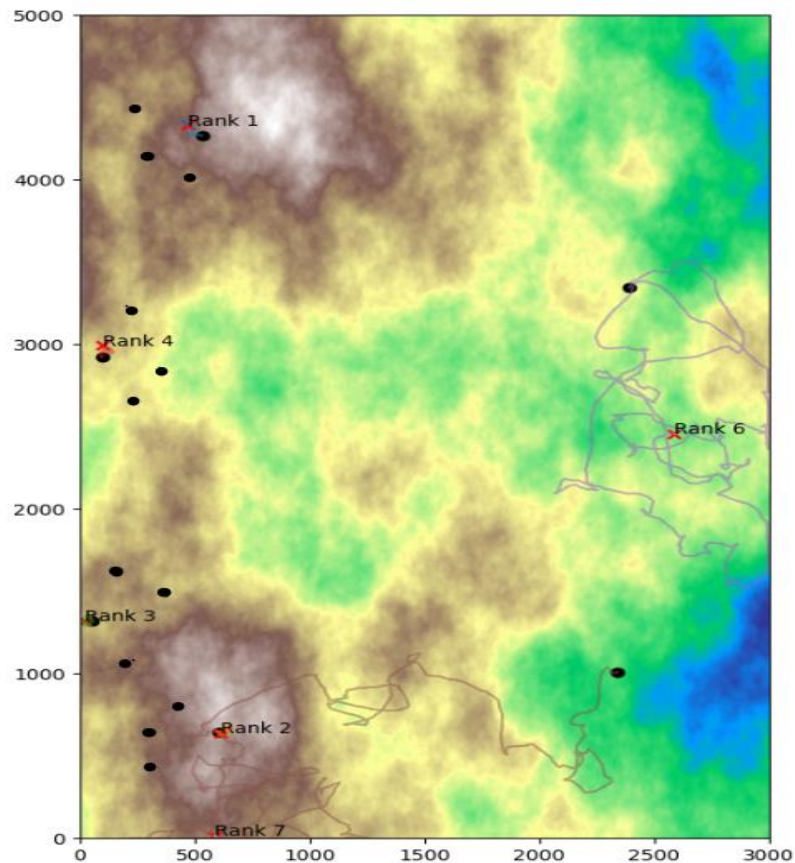


Рис. 9 – Порядок збору даних переміщення наземних комунікаційних вузлів з використанням моделі мобільності Range Zone Random Velocity Point

Висновки та перспективи подальшого дослідження. В результаті досліджень – встановлено, що завдання визначення місцезнаходження наземних комунікаційних вузлів, а саме збір та в подальшому оновлення інформації про місцезнаходження мобільних користувачів, для імітаційного моделювання процесів інформаційного обміну необхідно здійснити адекватне представлення ММ. Це дозволить забезпечити вихідні дані, необхідні для дослідження процесів маршрутизації в Ad-Hoc мережах та здійснювати прогноз якості інформаційного обміну, та управління маршрутизацією в умовах типових сценаріїв переміщення мобільних користувачів.

Проаналізовані моделі мобільності не враховують особливості функціонування в умовах динамічної топології, а саме вплив рельєфу місцевості на мобільність вузлів (характер зміни напрямку і швидкості руху). Для такого врахування, по-перше пропонується розглядати умови переміщення в тримірному просторі; по-друге застосувати коефіцієнт маневреності мобільного вузла і визначає на скільки змінюється швидкість вузла в залежності від типу і розміру перешкоди, по-третє здійснювати ранжування мобільних вузлів за їх прогнозованим функціональним призначенням.

Напрямок подальшого дослідження є застосування зібраних вихідних даних переміщення для дослідження протоколів маршрутизації під час інформаційного обміну, оцінки ефективності наземної мережі за рахунок вирішення задач управління переміщенням та комунікаційною складовою рангом мобільних базових станцій в автоматичному режимі.

Список бібліографічного опису

1. Bittium. (2023). Bittium Tough SDR handheld. Retrieved from <https://www.bittium.com/tactical-communications/bittium-tough-sdr-handheld>
2. Akyildiz, I. F., Ho, S. M., & Lin, Y.-B. (1996). Movement-based location update and selective paging for PCS networks. *IEEE/ACM Transactions on Network*, 4(4), pp.629–639.
3. Liang, B., & Haas, Z. (2003). Predictive distance-based mobility management for PCS networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11(5), pp.718–732.
4. Kumar, C., Bhushan, B., & Gupa, S. (2012). Evaluation of MANET Performance in Presence of Obstacles. *Journal of Ad hoc, Sensor & Ubiquitous Computing*, 3(3), pp.37-47.
5. Jin, M.-H., Horng, J.-T., Tsai, M.-F., & Wu, E. H.-K. (2007). Location query based on moving behaviors. *Journal of Information Systems*, 32(3), pp.385-401.

6. Premchaiswadi, W., Romsaiyud, W., & Premchaiswadi, N. (2011). Navigation without GPS: Fake Location for Mobile Phone Tracking. In Proceedings of 2011 IEEE International Conference on ITS Telecommunications, pp. 195-200.
7. Alenazi, M. J. F., Abbas, S. O., Almowuena, S., & Alsabaan, M. (2020). RSSGM: Recurrent Self-Similar Gauss–Markov Mobility Model. *Electronics*, 9, p. 89.
8. Gebrie, H., Farooq, H., & Imran, A. (2019). What Machine Learning Predictor Performs Best for Mobility Prediction in Cellular Networks? In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)). Shanghai, China, pp. 1–6.
9. Romsaiyud, W., Premchaiswadi, W., & Premchaiswadi, N. (2012). An Autonomous Group Mobility Prediction Model for Simulation of Mobile Ad-hoc through Wireless Network. *Journal of Wireless Networking and Communications*, 2(5), pp. 126-135. DOI: 10.5923/j.jwnc.20120205.07.
10. Romaniuk, V.A., & Bieliakov, R. (2023). Objective control functions of FANET communication nodes of land-air network. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, 50, pp. 125-130. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2023-50-19.
11. Chung, S.-H., Chang, W.-H., & Lin, K.W. (2011). Hybrid Routing Protocols for Ad Hoc Wireless Networks. *Journal of Ad Hoc, Sensor & Ubiquitous Computing*, 2(4), pp. 79-96.
12. Tsao, C.-L., Wu, Y.T., Liao, W., & Kuo, J.-C. (2006). Link duration of the random way point model in mobile ad-hoc networks. In Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Wireless Communications and Networking, pp. 367-371.
13. Kumar, S., Sharman, S.C., & Suman, B. (2010). Mobility Metrics Based Classification & Analysis of Mobility Model for Tactical Network. *Journal of Next-Generation Networks*, 2(3), pp. 39-51.
14. Vipin Pal, Girdhari Singh, Rajender Prasad Yadav (2012). SCHS: Smart Cluster Head Selection Scheme for Clustering Algorithms in Wireless Sensor Networks. *Wireless Sensor Network*, 4, 273-280 <http://dx.doi.org/10.4236/wsn.2012.411039>.

References

1. Bittium. (2023). Bittium Tough SDR handheld. Retrieved from <https://www.bittium.com/tactical-communications/bittium-tough-sdr-handheld>
2. Akyildiz, I. F., Ho, S. M., & Lin, Y.-B. (1996). Movement-based location update and selective paging for PCS networks. *IEEE/ACM Transactions on Network*, 4(4), pp.629–639.
3. Liang, B., & Haas, Z. (2003). Predictive distance-based mobility management for PCS networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11(5), pp.718–732.
4. Kumar, C., Bhushan, B., & Gupa, S. (2012). Evaluation of MANET Performance in Presence of Obstacles. *Journal of Ad hoc, Sensor & Ubiquitous Computing*, 3(3), pp.37-47.
5. Jin, M.-H., Horng, J.-T., Tsai, M.-F., & Wu, E. H.-K. (2007). Location query based on moving behaviors. *Journal of Information Systems*, 32(3), pp.385-401.
6. Premchaiswadi, W., Romsaiyud, W., & Premchaiswadi, N. (2011). Navigation without GPS: Fake Location for Mobile Phone Tracking. In Proceedings of 2011 IEEE International Conference on ITS Telecommunications, pp. 195-200.
7. Alenazi, M. J. F., Abbas, S. O., Almowuena, S., & Alsabaan, M. (2020). RSSGM: Recurrent Self-Similar Gauss–Markov Mobility Model. *Electronics*, 9, p. 89.
8. Gebrie, H., Farooq, H., & Imran, A. (2019). What Machine Learning Predictor Performs Best for Mobility Prediction in Cellular Networks? In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)). Shanghai, China, pp. 1–6.
9. Romsaiyud, W., Premchaiswadi, W., & Premchaiswadi, N. (2012). An Autonomous Group Mobility Prediction Model for Simulation of Mobile Ad-hoc through Wireless Network. *Journal of Wireless Networking and Communications*, 2(5), pp. 126-135. DOI: 10.5923/j.jwnc.20120205.07.
10. Romaniuk, V.A., & Bieliakov, R. (2023). Objective control functions of FANET communication nodes of land-air network. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, 50, pp. 125-130. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2023-50-19.
11. Chung, S.-H., Chang, W.-H., & Lin, K.W. (2011). Hybrid Routing Protocols for Ad Hoc Wireless Networks. *Journal of Ad Hoc, Sensor & Ubiquitous Computing*, 2(4), pp. 79-96.
12. Tsao, C.-L., Wu, Y.T., Liao, W., & Kuo, J.-C. (2006). Link duration of the random way point model in mobile ad-hoc networks. In Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Wireless Communications and Networking, pp. 367-371.
13. Kumar, S., Sharman, S.C., & Suman, B. (2010). Mobility Metrics Based Classification & Analysis of Mobility Model for Tactical Network. *Journal of Next-Generation Networks*, 2(3), pp. 39-51.
14. Vipin Pal, Girdhari Singh, Rajender Prasad Yadav (2012). SCHS: Smart Cluster Head Selection Scheme for Clustering Algorithms in Wireless Sensor Networks. *Wireless Sensor Network*, 4, 273-280 <http://dx.doi.org/10.4236/wsn.2012.411039>.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-18>

УДК 621.391

Васильківський Микола Володимирович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>

Болдирева Ольга Сергіївна, аспірант,

Варгатюк Ганна Леонідівна, аспірант,

Грабчак Назарій Віталійович, аспірант.

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

КОРИГУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ МІМО ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Васильківський М.В., Болдирева О.С., Варгатюк Г.Л., Грабчак Н.В. Коригування параметрів мобільних систем МІМО із використанням штучного інтелекту. Розглянуто методи імітаційного проектування систем МІМО з використанням штучного інтелекту. Генетичні алгоритми можуть бути використані для оптимізації конфігурації антен та параметрів системи МІМО. ШІ може моделювати різні комбінації параметрів, оцінювати їх продуктивність і еволюційним чином визначати оптимальні налаштування. Нейронні мережі можуть використовуватись для прогнозування каналу зв'язку та оптимізації передавальних стратегій. Вони можуть навчитись моделювати складні взаємозв'язки між властивостями каналу та продуктивністю системи МІМО. Методи навчання з підкріпленням можуть бути використані для вирішення проблеми керування передачею сигналу в системі МІМО. ШІ може взаємодіяти з динамічним середовищем, навчатись оптимальним стратегіям передачі сигналу та підлаштовувати їх в реальному часі. ШІ може використовуватись для розробки алгоритмів підтримки рішень у системах МІМО. Це може включати прийняття рішень про вибір оптимального режиму передачі, зміну налаштувань антен чи каналів відповідно до зміни умов зв'язку. Також ШІ може використовувати автоматичне навчання для адаптації системи МІМО до змінних умов зв'язку.

Результати досліджень мобільних систем МІМО з використанням штучного інтелекту формують передумови для розширення можливостей та покращення продуктивності таких систем за допомогою інтеграції ШІ-технологій. Використання ШІ дозволяє вирішувати задачі оптимізації та автоматичного налаштування параметрів систем МІМО, оскільки ШІ може ефективно аналізувати великі обсяги даних, моделювати різні сценарії та встановлювати оптимальні налаштування, що приводить до покращення продуктивності системи МІМО. ШІ може використовуватись для прогнозування властивостей каналу зв'язку у системах МІМО та управління каналом в режимі реального часу. Він може аналізувати стан каналу, прогнозувати його зміни та адаптивно реагувати на них, що сприяє покращенню якості зв'язку. Також ШІ може використовуватись для вирішення проблеми інтерференції, яка виникає в системах МІМО за рахунок можливості аналізувати та управляти розподілом потужності між антенами, визначати оптимальні стратегії передачі сигналів та забезпечувати мінімізацію впливу інтерференції на якість зв'язку. У підсумку, ШІ дозволяє системам МІМО адаптуватись до змінних умов зв'язку, таких як зміна шуму, інтерференції, рухливості користувачів. Таким чином, моделювання мобільних систем МІМО з використанням штучного інтелекту має практичну значимість, оскільки дозволяє покращити продуктивність, знизити витрати, підвищити енергоефективність та покращити якість обслуговування користувачів в мобільних мережах.

Ключові слова: просторово-часове кодування, мобільна система МІМО, штучний інтелект, управління каналом в режимі реального часу, якість обслуговування користувачів в мобільних мережах, оптимальна стратегія передачі сигналів.

Vasylykivskyi M., Boldyreva O., Vargatyuk H., Grabchak N. Adjusting the parameters of mobile MIMO systems using artificial intelligence. The methods of simulation design of MIMO systems using artificial intelligence are considered. Genetic algorithms can be used to optimize the configuration of antennas and parameters of the MIMO system. AI can simulate various combinations of parameters, evaluate their performance, and evolutionarily determine the optimal settings. Neural networks can be used to predict the communication channel and optimize transmission strategies. They can learn to model the complex relationships between channel properties and MIMO system performance. Reinforcement learning techniques can be used to solve the problem of controlling signal transmission in a MIMO system. AI can interact with a dynamic environment, learn optimal signal transmission strategies, and adjust them in real time. AI can be used to develop decision support algorithms in MIMO systems. This may include making decisions on the optimal transmission mode, changing antenna or channel settings in response to changing communication conditions. AI can also use automatic learning to adapt the MIMO system to changing communication conditions.

The results of research on mobile MIMO systems using artificial intelligence form the prerequisites for expanding the capabilities and improving the performance of such systems by integrating AI technologies. The use of AI allows solving the tasks of optimizing and automatically adjusting the parameters of MIMO systems, as AI can effectively analyze large amounts of data, model various scenarios, and set optimal settings, which leads to improved MIMO system performance. AI can be used to predict channel properties in MIMO systems and manage the channel in real time. It can analyze the state of the channel, predict its changes, and adaptively respond to them, which helps to improve the quality of communication. AI can also be used to solve the problem of interference that occurs in MIMO systems by being able to analyze and manage the power distribution between antennas, determine optimal signal transmission strategies, and ensure that the impact of interference on communication quality is minimized. As a result, AI allows MIMO systems to adapt to changing communication conditions, such as changes in noise, interference, and user mobility. Thus, modeling of mobile MIMO systems using artificial intelligence is of practical importance, as it allows to improve performance, reduce costs, increase energy efficiency, and improve the quality of user experience in mobile networks.

Keywords: spatio-temporal coding, mobile MIMO system, artificial intelligence, real-time channel management, quality of user experience in mobile networks, optimal signal transmission strategy.

Постановка наукової проблеми. Класичні бездротові канали зазвичай розглядаються як невідомий чорний ящик, оскільки їх поведінку важко передбачити заздалегідь. Однак, у сучасних бездротових системах зв'язку детальніше вивчається характеристика цих каналів. На канали бездротового зв'язку можуть впливати різні види завад, такі як гаусівський шум (шум, що має гаусівський розподіл), джитер (випадкові зміни в затримці сигналу), втрати в тракці передавання (втрати сигналу через поширення в середовищі), згасання (ослаблення сигналу залежно від довжини лінії передавання), затінення (втрата сигналу через завади), фазові та частотні шуми, завади [1]. Кожен з цих факторів може впливати на передачу сигналів по-різному. Отримання точної інформації про стан каналу (CSI) стає важливим для сучасних бездротових систем зв'язку. Це означає, що передавач і приймач повинні взаємодіяти і обмінюватися інформацією про канал, щоб оцінити його стан. Це може включати вимірювання параметрів каналу, таких як рівень сигналу, шумовий рівень, частотна характеристика, фазова інформація [2].

Важливо враховувати, що бездротові канали є динамічними та змінюються з часом. Точність оцінки CSI може знижуватися через зміну умов передачі, які можуть включати зміну середовища, рух об'єктів, завади та інші фактори. Також важливо враховувати вплив різних видів завад на передачу сигналу і оцінку CSI. Наприклад, гаусів шум може впливати на точність оцінки параметрів каналу, тоді як затінення та згасання можуть призводити до значних змін в переданих сигналах.

Для покращення точності оцінки CSI та керування каналом використовуються різні техніки. Наприклад, адаптивні алгоритми можуть змінювати параметри передачі сигналу в режимі реального часу, враховуючи отриману інформацію про стан каналу. Також використовуються технології, такі як MIMO, що використовують багатоантенні системи для поліпшення якості зв'язку та збільшення пропускної здатності. Отримання точної інформації про стан каналу є важливим етапом у вирішенні проблем бездротового зв'язку і дозволяє виконувати оптимальне керування каналом та підвищувати продуктивність бездротових систем зв'язку [3].

Моделі бездротових каналів, які використовуються для досліджень та розробки бездротових систем, є наближенням до реального каналу. Вони мають параметри, які повинні бути оцінені, і можуть містити помилки в оцінці.

Фізичний рівень бездротових систем виконує важливу роль у подоланні недоліків бездротового каналу. Він включає компоненти, які здатні пом'якшити різні типи спотворень каналу і відновити передані сигнали. Наприклад, коли сигнал поширюється до приймача кількома шляхами в бездротовому каналі, окремі канали можуть зазнавати різних канальних ефектів, таких як затухання, фазові зміни, затримки [4]. Методи диверсифікації використовують кілька отриманих сигналів з різних шляхів та спотворень каналу і використовують їх для покращення надійності передачі. Вони можуть включати методи комбінування (наприклад, максимального відношення сигнал-шум, відбору, посткомбінації), антенні масиви для просторової множинної обробки (наприклад, MIMO-системи), різні методи пом'якшення спотворень (наприклад, коригування характеристики каналу). Такі методи диверсифікації на фізичному рівні допомагають покращити якість зв'язку, забезпечують зниження впливу спотворень каналу і підвищують надійність передачі сигналів. Вони є важливими компонентами бездротових систем, що допомагають подолати ефекти каналу та покращити якість зв'язку [5].

Метою роботи є: дослідження та коригування ефективності систем MIMO із використанням алгоритмів штучного інтелекту, що дозволяє покращити пропускну здатність, забезпечити кращу якість зв'язку та підвищити продуктивність бездротових мобільних мереж.

Аналіз досліджень. Дослідження та оптимізація ефективності систем MIMO з використанням алгоритмів штучного інтелекту може включати такі аспекти. Автоматичне налаштування параметрів системи. ШІ може бути використаний для автоматичного налаштування параметрів системи MIMO, таких як вагові коефіцієнти, модуляція, частоти або розподіл ресурсів між антенами. Алгоритми навчання з підкріпленням або еволюційні алгоритми можуть допомогти вирішити цю задачу, оптимізуючи систему MIMO для досягнення кращої пропускної здатності та якості зв'язку. Керування множинним доступом. В системах MIMO, де кілька користувачів конкурують за доступ до спільного бездротового каналу, можна використовувати алгоритми ШІ для керування множинним доступом. Наприклад, алгоритми навчання можуть допомогти вибрати оптимальні ресурси, розподілити пропускну здатність між користувачами або забезпечити справедливий доступ до каналу. Прогнозування каналу та зменшення впливу канальних збурень. ШІ може використовуватись для прогнозування стану каналу в системах MIMO. З використанням методів машинного навчання, таких як нейронні мережі, можна розробити моделі, які здатні передбачати зміни каналу на основі історичних даних. Це дозволяє адаптувати передавальні

параметри та кодування для зменшення впливу каналних збурень і покращення якості зв'язку. Оптимальне розташування антен. III може допомогти вирішити проблему оптимального розташування антен в системах MIMO [6].

Створення стохастичної моделі каналу з обома компонентами зазвичай базується на аналізі вимірювань, проведених у різних середовищах. Однак така модель не здатна передбачати зміни на практиці для каналів, які постійно змінюються в часі. Це пов'язано з тим, що стохастичні моделі ґрунтуються на статистичних властивостях і неможливо точно передбачити майбутні зміни каналу, оскільки вони не враховують конкретні сигнали чи умови середовища, які можуть впливати на канал. [7]. Модель каналу, яка характеризує реальне каналне середовище, може бути використана для визначення вимог до фізичного рівня системи. Це дозволяє оптимізувати роботу системи, враховуючи особливості каналу зв'язку і забезпечити ефективне використання ресурсів для досягнення високої продуктивності та якості зв'язку.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. При адаптації алгоритмів фізичного рівня (ФІ) до моделювання каналів у системах 6G, однією з великих переваг є відсутність необхідності розробляти точну модель каналу і зосередження на взаємозв'язку між входом і виходом каналу. Замість цього використовуються методи, які базуються на штучному інтелекті, такі як нейронні мережі, для прогнозування параметрів каналу.

Важливим фактором ефективності підходу з попереднім навчанням є якість навчальних даних та якість самої нейронної мережі. Добре підготовлені навчальні дані з репрезентативними прикладами каналів дозволяють моделі каналу навчитися правильним залежностям. Крім того, оптимальний вибір архітектури і параметрів нейронної мережі впливає на її здатність до виконання завдання класифікації бездротових каналів. Варто враховувати розмірність вхідних даних, складність моделі каналу та інші особливості задачі. Ітеративний процес підбору архітектури та параметрів нейронної мережі може допомогти досягти оптимальної точності та продуктивності.

Додатково, важливо відзначити, що побудова якісної моделі каналу вимагає великої кількості репрезентативних навчальних даних. Ці дані повинні охоплювати широкий спектр реальних умов каналу, включаючи різні розташування, перешкоди та шуми. Збір таких даних може бути витратним і вимагати значних зусиль. Узагальнення алгоритмів нейронних мереж та методів аналізу головних компонент для моделювання бездротових каналів може допомогти зрозуміти та використовувати особливості каналів для покращення бездротових систем. Проте, слід враховувати, що успішність цих підходів залежить від якості навчальних даних, вибору архітектури мережі та налагодження її параметрів. Рекурентна нейронна мережа (RNN) дійсно має корисні властивості для моделювання послідовних даних, включаючи часові послідовності. Це може бути корисно для моделювання бездротових каналів, оскільки вони зазвичай мають динамічну поведінку залежно від часу [8].

Проте, важливо враховувати, що модель каналу з попереднім навчанням може бути обмежена узагальненням на різні сценарії каналу. Це означає, що вона може добре працювати на даних, які були використані для навчання, але може показувати гірші результати на нових, реалістичних сценаріях каналу. Узагальнення моделей каналів для більш реалістичних сценаріїв є важкою задачею, яка вимагає досліджень.

Попередньо навчений канал може виділяти особливості каналів і оновлювати ваги моделі, максимізуючи ймовірність правильного прогнозування даних. Це дозволяє навчати моделі каналів для різних завдань, таких як формування променя, користувацький парінг. Однак, ефективність цих моделей залежить від якості навчальних даних, які використовуються для навчання, а також від архітектури і параметрів моделі. Таким чином, використання RNN та попереднього навчання може бути корисним для моделювання бездротових каналів, але потребує додаткових досліджень для досягнення узагальнення на реалістичні сценарії каналу та оптимального навчання моделі [9].

Просторово-часове кодування (STBC) є методом, що поєднує кодування, модуляцію та рознесення каналів в системах з багатьма антенами. Він використовує ортогональну матрицю, що охоплює антени та часові періоди, для побудови кодових блоків. Ці блоки можуть бути декодовані за допомогою алгоритмів максимальної правдоподібності. STBC дозволяє досягти повної різноманітності, але має обмежений вииграш при кодуванні.

У протилежність до цього, просторово-часові блоки кодів (STTC) передають множину різноманітних даних через антени та час, і на приймачі відновлюють фактичну послідовність даних. Вони можуть досягти як виграшу в різноманітності, так і виграшу в кодуванні. Однак, процес декодування STTC є складнішим, оскільки він вимагає спільної оцінки послідовності з максимальною правдоподібністю. При проектуванні STBC розглядається система MIMO типу "точка-точка" з N_t передавальними антенами і N_r приймальними антенами, як показано на рис. 1.

© Васильківський М.В., Болдирева О.С., Варгатюк Г.Л., Грабчак Н.В.

Метою є побудова матриці кодування, яка забезпечує різноманітність і декодується з високою точністю. Це може бути досягнуто за допомогою різних методів кодування, таких як алгебраїчні коди, циклічні коди, лінійні просторово-часові коди [10].

Просторово-часове кодування є ефективним методом для покращення продуктивності систем МІМО, особливо в умовах каналу з високою кореляцією. Просторова рознесеність відноситься до використання багатьох передавальних і приймальних антен для створення незалежних шляхів з передавача до приймача. Це дозволяє знизити вплив каналних затухань, множинних променевих замирань та підвищити якість зв'язку. Кожна антена може передавати свою власну копію сигналу, що створює просторову різноманітність, яка покращує надійність та продуктивність передачі даних. Часове рознесення відноситься до використання послідовних символів у часі для передачі даних. Це означає, що кожна антена може передавати свою власну послідовність символів, які можуть бути розрізнені на приймачі. Використання часового рознесення дозволяє збільшити пропускну здатність системи та підвищити швидкість передачі даних. Комбінація просторового та часового рознесення в просторово-часовому кодуванні дозволяє досягти покращення продуктивності систем МІМО, забезпечуючи незалежність сигналів в просторі та часі [11].

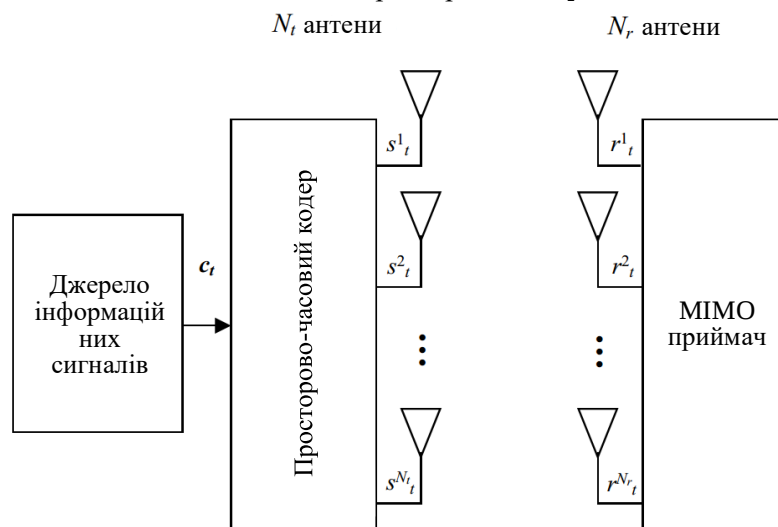


Рис. 1 – Система МІМО для просторово-часового кодування

Розглянемо привабливі риси ортогональних просторово-часових блокових кодів (OSTBC). Повний виграш у різноманітності. OSTBC забезпечують максимальну різноманітність, що означає, що вони максимізують незалежність між сигналами, які передаються по різних антенах та часових інтервалах. Це дозволяє знизити вплив каналних спотворень і покращити якість зв'язку. Проста структура приймача. OSTBC мають просту структуру приймача, оскільки можуть бути декодовані за допомогою декодування за принципом максимальної правдоподібності. Це спрощує процес декодування і знижує обчислювальну складність. Максимальний SNR або мінімальний MSE. OSTBC покращують відношення сигнал/шум (SNR) або знижують середньоквадратичну помилку (MSE) при отриманні сигналу на приймачі. Це сприяє збільшенню якості передачі і зниженню помилкових приймань. Легке усунення ISI завдяки ортогональності. OSTBC мають ортогональні властивості, що допомагають уникнути міжсимвольного впливу (ISI). Ортогональність кодів дозволяє зрушувати символи без взаємного впливу між ними, що сприяє полегшенню усунення ISI [12].

Хоча OSTBC є оптимальними з точки зору виграшу в різноманітності та простоти приймача, вони можуть бути неоптимальними з точки зору швидкості передачі даних. Швидкість передачі даних в системах з ортогональними просторово-часовими блоковими кодами (OSTBC) може бути обмежена кількістю передавальних антен та часових інтервалів. Кожна передавальна антена та часовий інтервал додають додаткові ступені вільності, які можуть використовуватися для передачі додаткових символів або бітів і, таким чином, підвищити швидкість передачі. Однак, збільшення кількості передавальних антен та часових інтервалів може збільшити складність системи та вимоги до ресурсів. Наприклад, збільшення кількості антен може призвести до складніших механізмів синхронізації, більшої споживання енергії та більшої складності обробки сигналу. Також, збільшення часових інтервалів може вимагати більшої пропускну здатності каналу та більшої точності синхронізації. Тому при проектуванні систем з OSTBC потрібно знаходити компроміс між швидкістю передачі даних та вимогами до ресурсів, враховуючи обмеження апаратного

забезпечення, каналу зв'язку та вимог до якості обслуговування [3].

Системи MIMO є необхідними для просторового мультиплексування (spatial multiplexing) з метою підвищення пропускної здатності та швидкості передачі даних в бездротових комунікаційних системах. Просторове мультиплексування дозволяє одночасно передавати декілька незалежних потоків даних через різні антени на передавачі та приймачі.

Основним принципом просторового мультиплексування є використання просторового рознесення, яке виникає завдяки наявності багатьох передавальних та приймальних антен. Кожна антена створює свій власний незалежний канал зв'язку, що дозволяє передавати окремі потоки даних через них одночасно. Це можливо завдяки тому, що сигнали, які передаються через різні антени, можуть бути розділені в просторі та незалежно відновлені на приймачі. Системи MIMO використовують різні технології, такі як масивне MIMO, багатокористувацьке MIMO та формування променя, для ефективного використання просторового рознесення та досягнення великої пропускної здатності. Вони дозволяють передавати багато незалежних потоків даних одночасно, забезпечуючи високу швидкість передачі та ефективне використання ресурсів бездротового каналу. Таким чином, системи MIMO є необхідними для просторового мультиплексування, яке дозволяє досягти високої пропускної здатності та ефективної передачі даних в бездротових комунікаційних системах, як показано на рисунку 2.

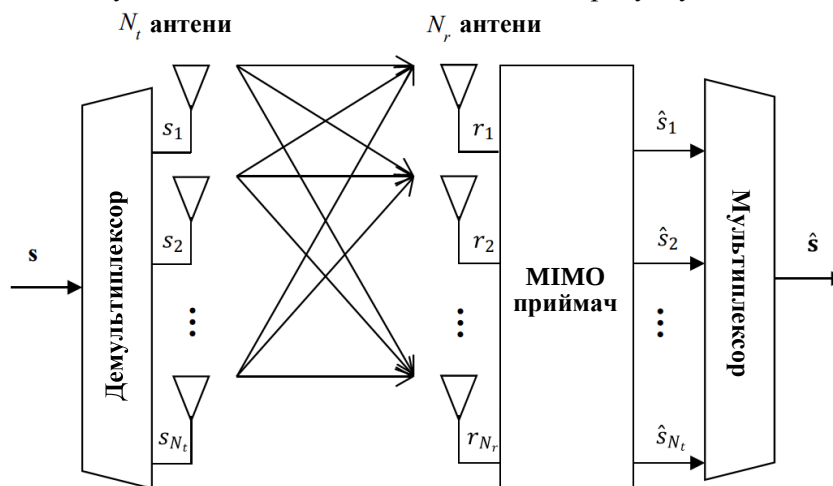


Рис. 2 – Система MIMO для просторового мультиплексування

Складність системи MIMO збільшується зі зростанням кількості передавальних антен і порядку модуляції. Це пов'язано з більшою обчислювальною складністю, необхідною для обробки сигналів із більшою кількістю антен і більш складними модуляційними схемами. Лінійні методи виявлення, такі як узгоджений фільтр (MF), нульове придушення (ZF) і мінімальна середньоквадратична помилка (MMSE), використовують інверсію каналу MIMO для виявлення переданих символів. Ці методи вимагають обчислення оберненого каналу, що може бути обчислювально витратним завданням, особливо при великій кількості антен.

Метод виявлення максимальної правдоподібності (МП) є одним з найбільш точних, але він також вимагає значних обчислювальних ресурсів. Цей метод вимагає оцінки переданого символу за допомогою різних версій каналу MIMO, множення і квантування. Чим більша кількість антен і більш висока складність модуляції, тим більше обчислювальних ресурсів буде потрібно для здійснення методу виявлення МП [4]. Загалом, враховуючи складність і обчислювальні вимоги, вибір методу виявлення в системах MIMO залежить від компромісу між точністю виявлення та обчислювальною складністю, яка може бути прийнятною для конкретного застосування.

Варто відзначити важливість точної оцінки матриці каналу MIMO при лінійному виявленні. Це особливо важливо в умовах високого відношення сигнал-шум (SNR), коли виявлення може бути вдосконалене завдяки точним оцінкам каналу.

Метод послідовного придушення завад (SIC) є компромісом між виявленням максимальної правдоподібності (ML) і лінійним виявленням. Він показує кращу продуктивність, ніж лінійне виявлення, але не досягає ефективності ML. Виявлення SIC використовує обнулення і скасування для виділення переданих символів з прийнятих сигналів. У методі SIC виявлення відбувається поетапно, починаючи з виявлення одного шару (часткової послідовності символів від однієї передавальної антени) і продовжуючи до виявлення всіх шарів. Кожен шар виявляється шляхом віднімання виявлених шарів з попередніх етапів. Таким чином, виявлення відбувається ітеративно.

до тих пір, поки не будуть виявлені всі шари. Недоліком методу SIC є поширення помилок. Якщо прийняте рішення щодо переданого символу виявляється неправильним на одному етапі, це може вплинути на виявлення наступних шарів. Тому використовується техніка впорядкування, щоб мінімізувати поширення помилок. Впорядковане обнулення та скасування означає, що перший символ з найвищим SNR передається як найнадійніший символ, а потім передаються символи з меншим SNR.

В порівнянні з виявленням максимальної правдоподібності (ML), лінійне виявлення і метод SIC мають меншу складність. Виявлення ML є оптимальним з точки зору продуктивності, оскільки досягає найкращої можливої ефективності виявлення. Однак, воно вимагає значних обчислювальних ресурсів і часу для оцінки всіх можливих комбінацій переданих символів. Лінійне виявлення, які використовують методи, такі як узгоджений фільтр (MF), нульове придушення (ZF) і мінімальна середньоквадратична помилка (MMSE), мають значно меншу складність. Вони базуються на інверсії каналу MIMO і вимагають оцінки матриці каналу. Хоча вони не досягають ефективності ML, вони можуть забезпечити задовільну продуктивність при достатньо високому SNR [5].

Метод SIC, як зазначено, знаходиться між лінійним виявленням і виявленням ML за рівнем продуктивності. Він забезпечує кращу продуктивність, ніж лінійне виявлення, але залишається менш складним, ніж виявлення ML. Використання методу SIC дозволяє покращити продуктивність в умовах низького SNR. Отже, хоча лінійне виявлення і метод SIC не досягають оптимальної ефективності виявлення, вони є менш складними альтернативами, які можуть забезпечити прийнятну продуктивність в багатоантенних системах MIMO.

Масивна MIMO є важливою технологією в системах зв'язку п'ятого покоління (5G). Масивна MIMO використовує велику кількість антен на базовій станції для одночасного обслуговування багатьох мобільних пристроїв. За допомогою масивної MIMO, базова станція може передавати різні сигнали до різних мобільних пристроїв одночасно за допомогою просторового мультиплексування. Це дозволяє досягти високої спектральної ефективності, оскільки багато пристроїв можуть отримувати дані одночасно на одній частоті. Крім того, масивна MIMO забезпечує енергоефективність, оскільки може знизити випромінювану потужність за рахунок просторової фокусування сигналу до конкретних користувачів.

У порівнянні з технологією MIMO в 4G, масивна MIMO 5G використовує більшу кількість антен і може обслуговувати більшу кількість пристроїв одночасно. Це призводить до значного покращення продуктивності мережі, збільшення швидкості передачі даних та зниження затримки. Технологія масивної MIMO є однією з ключових інновацій в системах 5G і вона відіграє важливу роль у поліпшенні продуктивності, ефективності та потужності бездротових мереж.

Основні технічні характеристики масивного MIMO можуть бути підсумовані наступним чином. Операція TDD є необхідною для масивного MIMO через його взаємну залежність. Вона дозволяє використовувати одну частоту для передачі і прийому даних, використовуючи різний часовий розподіл, що забезпечує високу ефективність передачі. Зміцнення каналу усуває ефект швидких замирань і забезпечує стабільність якості зв'язку. Масивний MIMO здатний зробити зміцнення каналу більш повільним, що корисно для ефективного розподілу ресурсів між користувачами і забезпечення високої якості обслуговування (QoS).

Замкнутий бюджет каналу зв'язку в масивному MIMO пропорційний кількості антен на базовій станції. Це означає, що збільшення кількості антен дозволяє покращити бюджет каналу і загальну продуктивність системи. Це особливо корисно для забезпечення якісного обслуговування в комірці з великою кількістю користувачів. Масивний MIMO має відносно низьку складність алгоритмів попереднього кодування і декодування. Це забезпечує ефективну обробку сигналу при великій кількості антен, сприяючи покращенню продуктивності і зниженню обчислювального навантаження.

Повна цифрова обробка сигналу в масивному MIMO є корисною як для спектральної ефективності, так і для енергоефективності. Вона дозволяє ефективно використовувати доступний спектр і зменшувати вплив шуму та спотворень каналу, забезпечує більш точне і надійне декодування сигналів. Крім того, повна цифрова обробка дозволяє гнучко налаштовувати параметри системи і здійснювати широкий спектр оптимізаційних рішень для досягнення кращої продуктивності і збереження енергії [6]. Отже, масивна MIMO є технологією, яка забезпечує високу спектральну ефективність, покращення якості зв'язку, збільшення бюджету каналу зв'язку та має низьку складність обробки сигналу. Вона відіграє важливу роль у розвитку систем 5G і має потенціал для покращення продуктивності та ефективності бездротових мереж у майбутньому.

Розглянемо певні практичні обмеження, які можуть вплинути на реалізацію масивного MIMO. Збільшення кількості антен на базовій станції вимагає відповідного фізичного простору, високої потужності живлення та складних антенних решіток. Це може вплинути на вартість, розмір та енергоефективність системи. Збільшення кількості антен може призвести до збільшення взаємодії між ними, таких явищ як міжсимвольна та міжканальна інтерференція. Це може потребувати складніших алгоритмів обробки сигналів та ефективного керування взаємодією між антенами. Висока мобільність мобільних пристроїв може призводити до швидкої зміни каналу, що може ускладнити оцінку каналу та вимагати додаткових ресурсів для виявлення та коригування каналових змін. Для оцінки каналу та виявлення сигналів необхідно використовувати пілотні сигнали. Однак, кількість доступних ортогональних пілотних сигналів обмежена, тому зі збільшенням кількості антен можуть виникати проблеми з обмеженою кількістю пілотних сигналів та забрудненням пілотів.

Збільшення кількості антен у масивному MIMO призводить до збільшення обчислювальної складності алгоритмів обробки сигналів, зокрема оцінки каналу. Оцінка каналу вимагає обчислення великої кількості параметрів каналу, таких як коефіцієнти передачі сигналу для кожної пари антена-пристрій. Зі збільшенням кількості антен цей обчислювальний обсяг збільшується пропорційно.

Точна інформація про стан каналу (CSI) є ключовим фактором для покращення продуктивності систем MIMO. Величезний обсяг даних, що генеруються масивними системами MIMO, створює можливості для використання алгоритмів штучного інтелекту (AI) для аналізу цих даних. AI може допомогти виявити корисну інформацію з великих обсягів даних, таку як точна CSI, яка може бути використана для покращення ефективності системи MIMO.

Масивна антенна решітка має великий розмір матриці, що ставить вимоги до обчислювальної потужності для виявлення сигналу та оцінки каналу. Тут AI може використовуватись для оптимізації обчислювальних процесів та забезпечення ефективного використання ресурсів.

Пілотне забруднення, яке виникає через інтерференцію між сусідніми стільниками, є однією з проблем, яка впливає на точність інформації про стан каналу. Тут AI може бути використаний для виявлення та компенсації цього забруднення, що допомагає покращити якість інформації про канал. Основні підходи до застосування алгоритмів ШІ в системах MIMO можна узагальнити, як показано в таблиці 1.

Таблиця 1 Підходи до проектування систем MIMO зі штучним інтелектом

Методи MIMO	Підходи до проектування
Вибір променю визначає, які антени та спрямованість сигналу будуть використовуватися для передачі та отримання даних та є важливим етапом для досягнення оптимальної продуктивності та забезпечення надійного зв'язку.	Застосування згорткових нейронних мереж (CNN) для класифікації інформації про променевий канал може бути ефективним підходом, оскільки CNN може вчитися виявляти різні характеристики та шаблони вхідних даних, які можуть бути корисними для класифікації номерів променів.
Розпізнавання радіомодуляції є важливим завданням в системах MIMO, оскільки різні радіосигнали можуть використовувати різні схеми модуляції. Для ефективного використання каналу та оптимального прийому сигналу в системах MIMO необхідно точно розпізнавати радіомодуляцію.	Використання згорткових нейронних мереж (CNN) для високоточного автоматичного розпізнавання модуляції (AMR) може бути ефективним підходом. Для досягнення високої точності розпізнавання, часто використовуються два різні набори даних, а саме "навчальний" та "тестовий" набори даних. Навчання та оцінка моделі CNN виконуються за допомогою ітераційного процесу, де модель навчається на навчальному наборі даних, а потім оцінюється на тестовому наборі даних.
Попереднє кодування та отримання CSI в системах MIMO дозволяють досягнути кращої продуктивності та забезпечити ефективне використання доступного каналу для передачі сигналів.	Використовуючи навчену нейронну мережу та миттєвий і статистичний CSI, попереднє кодування векторів призначене для максимізації сумарної швидкості за умови обмеження загальної потужності передачі. Складність попереднього кодування MIMO суттєво зменшується порівняно з існуючим ітеративним алгоритмом

Вибір антени є важливим аспектом в методах МІМО, який впливає на продуктивність, надійність та якість передачі даних в системі МІМО.	Використання CNN для вибору МІМО-антени та проектування гібридного формувача променя дозволяє автоматизувати цей процес і забезпечити оптимальну настройку системи МІМО залежно від умов каналу та потреб додатку.
Виявлення МІМО за допомогою неконтрольованого навчання можуть бути використані різні алгоритми кластеризації.	Найкращий алгоритм кластеризації для виявлення МІМО може залежати від конкретного сценарію та особливостей системи МІМО. Ефективні результати виявлення МІМО можуть бути досягнуті шляхом поєднання декількох алгоритмів або використання гібридних підходів, які комбінують переваги різних методів

Отже, комбінація різних методів, таких як передача з мітками та модель гаусової суміші з обмеженою модуляцією, може бути використана для вирішення проблем виявлення МІМО. Використання передачі з мітками дозволяє встановити відповідність між кластерами і переданими символами, що полегшує інтерпретацію результатів кластеризації. Однак цей підхід може потребувати додаткових витрат на маркування сигналів.

Крім того, можуть бути використані інші підходи, такі як використання штучних нейронних мереж для виявлення МІМО. Ці моделі можуть навчитися розпізнавати закономірності в прийнятих сигналах і здійснювати виявлення без прив'язки до певних моделей чи обмежень. Всі ці підходи мають свої переваги і обмеження, і вибір конкретного методу залежить від специфічних вимог та обмежень системи МІМО.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Виконані дослідження систем МІМО із просторово-часовим кодуванням показали значні результати. Використання просторового мультиплексування дозволяє збільшити покриття та зони покриття бездротової мережі. Основні результати досліджень у цьому напрямку включають: збільшення ємності мережі, розширення покриття мережі, збільшення ефективності використання ресурсів, підвищення швидкості передачі даних. Таким чином, моделювання мобільних систем МІМО з використанням штучного інтелекту має практичну значимість, оскільки дозволяє покращити продуктивність, знизити витрати, підвищити енергоефективність та покращити якість обслуговування користувачів в мобільних мережах. Зокрема, забезпечуються передумови для підвищення швидкості передачі даних в мобільній системі до 1 Тбіт/секунду та зменшення затримки до менше 1 мілісекунди.

Список бібліографічного опису

1. H. He, C.-K. Wen, S. Jin, G.Y. Li, Deep learning-based channel estimation for beamspace mmWave massive MIMO systems. *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 7(5), 852–855 (2018)
2. H. Tang, J. Wang, L. He, Off-grid sparse Bayesian learning based channel estimation for mmWave massive MIMO uplink. *IEEE Wireless Commun. Lett.* 8(1), 45–48 (2019)
3. H. Kim, Design and Optimization for 5G Wireless Communications (Wiley, 2020). ISBN 9781119494553
4. H. Kim, Y.H. Jiang, R. Rana, Communication algorithms via deep learning. <https://arxiv.org/abs/1805.09317> (2018)
5. O. Shental, J. Hoydis, Machine Learning: Learning to softly demodulate, in *IEEE Globecom Workshops 2019, HI, USA* (2019), pp. 1–7
6. E. Björnson, J. Hoydis, L. Sanguinetti, Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency (Now Publishers, 2018). <https://doi.org/10.1561/20000000093>
7. Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2022). Дослідження архітектури штучного інтелекту для інфокомунікаційних мереж 6G. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 62–70. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-7>
8. Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2022). Інтелектуальна оптимізація інфокомунікаційних мереж множинного доступу. *Вісник Хмельницького національного університету*, (6), 32–39. [https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6\(2\)-32-39](https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6(2)-32-39)
9. Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2023). Інтелектуальний радіоінтерфейс з підтримкою штучного інтелекту. *Вісник Хмельницького національного університету*, (1), 26–32. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-26-32>
10. Васильківський, М., Прикмета, А., Олійник, А., & Нікітович, Д. (2023). Оптимізація інтелектуальних телекомунікаційних мереж. *Вісник Хмельницького національного університету*, (1), 33–41. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-33-41>
11. Васильківський, М., Болдирева, О., Варгатюк, Г., & Будащ, М. (2023). Керування телекомунікаційними мережами з використанням технологій AI/ML. *Measuring and computing devices in technological processes*, (1), 89–100. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-73-1-13>
12. Васильківський, М., Болдирева, О., Онищук, Д., & Гнатенко, Ю. (2023). Динамічна інформаційна мережа із вбудованим штучним інтелектом. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, (50), 36–45.

<https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-05>

References

1. H. He, C.-K. Wen, S. Jin, G.Y. Li, Deep learning-based channel estimation for beamspace mmWave massive MIMO systems. *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 7(5), 852–855 (2018)
2. H. Tang, J. Wang, L. He, Off-grid sparse Bayesian learning based channel estimation for mmWave massive MIMO uplink. *IEEE Wireless Commun. Lett.* 8(1), 45–48 (2019)
3. H. Kim, *Design and Optimization for 5G Wireless Communications* (Wiley, 2020). ISBN 9781119494553
4. H. Kim, Y.H. Jiang, R. Rana, Communication algorithms via deep learning. <https://arxiv.org/abs/1805.09317> (2018)
5. O. Shental, J. Hoydis, Machine LLRning: Learning to softly demodulate, in *IEEE Globecom Workshops 2019, HI, USA* (2019), pp. 1–7
6. E. Björnson, J. Hoydis, L. Sanguinetti, *Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency* (Now Publishers, 2018). <https://doi.org/10.1561/20000000093>
7. Vasylykivskiy M., Varhatiuk, H., & Boldyreva, O. (2022). Doslidzhennya arkhitektury shchuchnoho intelektu dlya infokomunikatsiynykh merezh 6G. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 62–70. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-7>
8. Vasylykivskiy M., Varhatiuk, H., & Boldyreva, O. (2022). Intelektual'na optymizatsiya infokomunikatsiynykh merezh mnozhynnoho dostupu. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu*, (6), 32–39. [https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6\(2\)-32-39](https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6(2)-32-39)
9. Vasylykivskiy M., Varhatiuk, H., & Boldyreva, O. (2023). Intelektual'nyy radiointerfeys z pidtrymkoyu shchuchnoho intelektu. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu*, (1), 26–32. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-26-32>
10. Vasylykivskiy, M., Prykmeta, A., Oliynyk, A., & Nikitovych, D. (2023). Optymizatsiya intelektual'nykh telekomunikatsiynykh merezh. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu*, (1), 33–41. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-33-41>
11. Vasylykivskiy M., Boldyreva, O., Varhatiuk, H., & Budash, M. (2023). Keruvannya telekomunikatsiynymy merezhamy z vykorystannyam tekhnolohiy AI/ML. *Measuring and computing devices in technological processes*, (1), 89–100. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-73-1-13>
12. Vasylykivskiy, M., Boldyreva, O., Onyshchuk, D., & Hnatenko, Y. (2023). Dynamichna informatsiyna merezha iz vbudovanyim shchuchnym intelektom. *Komp'yuterno-intehrovani tekhnolohiyi: osvita, nauka, vyrobnytstvo*, (50), 36–45. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-05>

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-19>

УДК 621.391

Васильківський Микола Володимирович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>

Нікітович Діана Вікторівна, аспірант

<https://orcid.org/0000-0002-8907-1221>

Болдирева Ольга Сергіївна, аспірант

Якубівська Наталя Володимирівна, магістр

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ КОРИГУВАННЯ ФІЗИЧНОГО РІВНЯ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ

Васильківський М.В., Нікітович Д.В., Болдирева О.С., Якубівська Н.В. Інтелектуальні технології коригування фізичного рівня мобільних мереж. Досліджено інтелектуальні технології коригування фізичного рівня мобільних мереж, які використовуються для оптимізації та покращення роботи бездротових комунікаційних систем. Такі технології дозволяють вдосконалювати ефективність передачі даних, збільшувати пропускну здатність та знижувати помилки передачі. Зокрема розглянуто структуру наскрізного фізичного рівня на основі навчання з підкріпленням, яке вивчає, як агент повинен приймати рішення в певному середовищі, щоб максимізувати деяку винагороду або очікувану користь. У контексті фізичного рівня мережі, навчання з підкріпленням може бути використане для оптимізації поведінки агента, який впливає на передачу даних та керування параметрами каналу.

Запропоновано модель блоку фізичного рівня мережі з генеративним штучним інтелектом, яка може використовуватися для покращення ефективності та надійності передачі даних у бездротових комунікаційних системах. Основною метою такої моделі є генерація оптимальних сигналів або налаштування параметрів передачі даних з метою максимізації пропускну здатності, мінімізації помилок передачі та забезпечення якісного зв'язку.

Досліджено взаємодію між блоком фізичного рівня мережі і алгоритмом штучного інтелекту через кілька способів, залежно від конкретної ситуації і контексту використання. Алгоритм штучного інтелекту може отримувати дані з фізичного рівня мережі, наприклад, інформацію про стан мережевих пристроїв, пропускну здатність, шум, затримки. Ці дані можуть бути передані через спеціальний інтерфейс або протокол з фізичного рівня до алгоритму штучного інтелекту для подальшого аналізу та обробки. Алгоритм штучного інтелекту може надавати команди мережевим пристроям на фізичному рівні, наприклад, для налаштування параметрів, оптимізації роботи мережі, виявлення аномальної поведінки. Ці команди можуть бути передані через певний протокол або інтерфейс з алгоритму штучного інтелекту до мережевих пристроїв. Алгоритм штучного інтелекту може аналізувати дані з фізичного рівня мережі для виявлення відхилень, помилок або збоїв у роботі мережі. При виявленні таких ситуацій алгоритм може відправляти повідомлення адміністратору мережі або виконувати автоматичні дії для відновлення роботи мережі. Досліджено оптимізацію ресурсів в контексті взаємодії блоку фізичного рівня мережі з алгоритмом штучного інтелекту. Алгоритм штучного інтелекту може аналізувати навантаження на мережеві ресурси на фізичному рівні і розподіляти пропускну здатність між різними пристроями або каналами з метою досягнення оптимального використання доступних ресурсів. Алгоритм штучного інтелекту може аналізувати історичні дані трафіку на фізичному рівні мережі і прогнозувати майбутні трафікові потоки. Це дозволяє забезпечити ефективне планування ресурсів і адаптувати мережеві налаштування для задоволення передбачуваних потреб.

Запропоновано модель блоку фізичного рівня з вбудованим алгоритмом штучного інтелекту у форматі комбінації апаратного та програмного забезпечення, яка поєднує функціональні можливості фізичного рівня мережі з інтелектуальними алгоритмами. Визначено методи підвищення продуктивності фізичного рівня бездротових систем за допомогою технології генеративного штучного інтелекту (ГШІ): оптимізація параметрів системи, виявлення шаблонів, аналіз даних та оптимальне планування тренувань і автоматичне регулювання параметрів мереж.

Ключові слова: коригування фізичного рівня мобільних мереж, структура наскрізного фізичного рівня мережі, генеративний штучний інтелект, апаратне та програмне забезпечення, інтелектуальний алгоритм, автоматичне регулювання параметрів телекомунікаційної системи.

Vasylykivskyi M., Nikitovych D., Boldyreva O., Yakubivska N. Intelligent technologies for adjusting the physical layer of mobile networks. The paper investigates intelligent technologies for adjusting the physical layer of mobile networks, which are used to optimize and improve the performance of wireless communication systems. Such technologies allow to improve the efficiency of data transmission, increase bandwidth and reduce transmission errors. In particular, we consider the structure of the end-to-end physical layer based on reinforcement learning, which studies how an agent should make decisions in a certain environment to maximize some reward or expected benefit. In the context of the physical layer of the network, reinforcement learning can be used to optimize the behavior of an agent that affects data transmission and control of channel parameters.

We propose a model of a physical network layer unit with generative artificial intelligence that can be used to improve the efficiency and reliability of data transmission in wireless communication systems. The main purpose of such a model is to generate optimal signals or adjust data transmission parameters in order to maximize throughput, minimize transmission errors, and ensure high-quality communication.

The interaction between the physical network layer unit and the artificial intelligence algorithm is investigated in several ways, depending on the specific situation and context of use. The artificial intelligence algorithm can receive data from the physical layer of the network, for example, information about the status of network devices, bandwidth, noise, and delays. This data can be transmitted through a special interface or protocol from the physical layer to the artificial intelligence algorithm for further analysis and processing. The artificial intelligence algorithm can issue commands to network devices at the physical layer, for example, to configure parameters, optimize network performance, and detect abnormal behavior. These commands can be transmitted through a specific protocol or interface from the AI algorithm to the network devices. The artificial intelligence algorithm can analyze data

from the physical layer of the network to detect deviations, errors, or failures in the network. When such situations are detected, the algorithm can send notifications to the network administrator or perform automatic actions to restore the network. We investigate resource optimization in the context of the interaction of a physical network layer unit with an artificial intelligence algorithm. An artificial intelligence algorithm can analyze the load on network resources at the physical level and distribute bandwidth between different devices or channels in order to achieve optimal use of available resources. The AI algorithm can analyze historical traffic data at the physical layer of the network and predict future traffic flows. This allows for effective resource planning and adaptation of network settings to meet anticipated needs.

A model of a physical layer unit with a built-in artificial intelligence algorithm in the format of a combination of hardware and software that combines the functionality of the physical layer of the network with intelligent algorithms is proposed. The methods for improving the performance of the physical layer of wireless systems using generative artificial intelligence (GAI) technology are determined: optimization of system parameters, pattern detection, data analysis and optimal training planning, and automatic adjustment of network parameters.

Keywords: adjustment of the physical layer of mobile networks, structure of the end-to-end physical layer of the network, generative artificial intelligence, hardware and software, intelligent algorithm, automatic adjustment of telecommunication system parameters.

Постановка наукової проблеми. Постійне підвищення надійності та продуктивності стільникових систем є важливою метою досліджень фізичного рівня. Це вимагає оптимізації архітектури та використання нових технологій, щоб забезпечити високу пропускну здатність і мінімальну кількість бітових помилок. Одним із способів досягнення цих цілей є розвиток нових модуляційних схем та кодування, які забезпечують високу ефективність передачі даних при мінімальній кількості помилок. Технології, такі як використання більш широкого діапазону частот, міжсимвольного впливу та мінімізації міжканального впливу, також допомагають покращити продуктивність систем. Оптимізація архітектури фізичного рівня також є важливим аспектом. Використання адаптивного керування потужністю, множинного доступу з розподіленим керуванням ресурсами та алгоритмів планування ресурсів може покращити ефективність використання каналу і забезпечити кращу продуктивність системи. При розвитку 6G мережі додатковою вимогою стає зниження затримок і підвищення енергоефективності. Це вимагає розробки нових алгоритмів та технологій для ефективного управління ресурсами, врахуванням рухомих об'єктів та масштабування мережі [3].

Подолання проблем дослідження фізичного рівня бездротових мереж вимагає великого зусилля через ряд викликів, з якими стикаються стільникові системи, такі як 5G і майбутні 6G. Одним з цих викликів є величезний обсяг даних, що обробляються в стільникових системах. З ростом популярності мультимедійних додатків, Інтернету речей (IoT) та інших джерел даних, мережі потребують забезпечення достатньої пропускну здатності та швидкості передачі для задоволення потреб користувачів. Досягнення цих вимог можливе завдяки використанню алгоритмів штучного інтелекту (AI). AI може допомогти в оптимізації ресурсів, виявленні та усуненні помилок, передбаченні затримок та прогнозуванні трафіку. Застосування AI до стільникових систем дозволяє покращити продуктивність, забезпечити більш ефективне управління ресурсами та знизити вплив затримок. Однак, існують виклики, пов'язані з застосуванням AI в стільникових системах, такі як складність обробки в реальному часі, споживання енергії та безпека. Для успішного впровадження AI в стільникові системи необхідні додаткові дослідження та розробки, які вирішать ці виклики та забезпечать ефективну роботу AI-алгоритмів у мобільних мережах. Загалом, застосування алгоритмів AI до стільникових систем є перспективним напрямом досліджень, який може допомогти вирішити складні завдання та підвищити продуктивність та надійність цих систем.

Метою роботи є: алгоритми підвищення продуктивності фізичного рівня бездротових систем за рахунок використання технології генеративного штучного інтелекту для оптимізації функціональних параметрів, адаптації до змінних умов експлуатації тракту передавання із дотриманням допустимої обчислювальної складності, ефективності та надійності.

Аналіз досліджень. Штучний інтелект може відіграти важливу роль у розвитку бездротових систем. Традиційні математичні моделі можуть бути складними і непрактичними для точного відображення всіх аспектів бездротових систем, особливо при врахуванні різноманітних факторів, таких як змінність каналу, мінливість умов зв'язку та різноманітність вимог користувачів. Застосування підходів, заснованих на даних та штучному інтелекті, дозволяє використовувати великі обсяги реальних даних для побудови моделей та прийняття розумних рішень. Алгоритми машинного навчання та глибокого навчання можуть виявляти складні зв'язки та патерни у даних, що допомагає оптимізувати параметри та функціонування бездротових систем. Застосування підходів, заснованих на даних, дозволяє більш гнучко моделювати та оптимізувати бездротові

системи залежно від змінних умов та вимог. Врахування реальних даних дозволяє більш точно прогнозувати трафік, передбачати змінність каналу та використовувати адаптивне керування ресурсами для досягнення кращої продуктивності та надійності мережі. Однак, важливо враховувати, що розробка моделей, заснованих на даних та штучному інтелекті, також потребує великої кількості якісних даних для тренування та перевірки моделей. Отримання цих даних може бути викликом, особливо для нових поколінь бездротових систем, таких як 6G [4].

Традиційні математичні моделі можуть бути недостатніми для аналізу складних нелінійних спотворень, особливо на високих частотах. Проблеми нелінійності можуть виникати через різні фізичні ефекти, такі як нелінійність підсилювачів, міжмодуляційна та міжносійна інтерференція. Штучний інтелект, зокрема методи машинного навчання та глибинного навчання, може бути потужним інструментом для моделювання та лінеаризації складних нелінійних спотворень. Ці алгоритми можуть вивчати зв'язки між вхідними та вихідними сигналами на основі великого обсягу реальних даних. Це дозволяє побудувати моделі, які краще апроксимують нелінійні спотворення та допомагають зрозуміти вплив цих спотворень на систему. Застосування алгоритмів штучного інтелекту на базі даних дозволяє здійснювати адаптацію до змінного середовища каналу, що особливо корисно в бездротових системах, де умови зв'язку можуть змінюватися від моменту до моменту. Це дозволяє покращити продуктивність, забезпечити більшу стабільність та ефективність бездротових систем [6].

Такий підхід на основі штучного інтелекту дійсно може спростити процес проектування та оптимізації бездротових систем, оскільки не потрібно створювати складні аналітичні моделі для опису всіх нелінійних спотворень. Замість цього, алгоритми штучного інтелекту можуть навчитися залежностей між вхідними та вихідними даними на основі реальних спостережень та експериментів. Це дозволяє зосередитися на практичних питаннях, таких як підвищення пропускної здатності, зменшення затримок, підвищення енергоефективності та досягнення високої щільності з'єднань у бездротових системах. Алгоритми штучного інтелекту можуть виявити складні зв'язки та патерни у великих обсягах даних та використовувати цю інформацію для прийняття розумних рішень щодо оптимізації роботи системи. При використанні підходів на основі штучного інтелекту, таких як нейронні мережі, можливе автоматичне виявлення нелінійних залежностей та адаптація до змінного середовища каналу. Це може покращити продуктивність бездротової системи та забезпечити ефективну передачу даних з урахуванням зміни умов. Отже, підхід на основі штучного інтелекту дозволяє спростити процес проектування та оптимізації бездротових систем, забезпечуючи підвищену продуктивність, зниження затримок, енергоефективність та досягнення більшої щільності з'єднань [7].

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Впровадження алгоритмів штучного інтелекту на фізичному рівні мереж вимагає вирішення нових викликів, особливо стосовно управління мережевими даними. Обробка, структурування та аналіз великих обсягів даних, що генеруються на фізичному рівні мереж, є важливим етапом для використання алгоритмів штучного інтелекту.

Наразі активно ведуться дослідження та розробки з впровадження алгоритмів штучного інтелекту на фізичному рівні мереж з метою досягнення високої продуктивності та ефективного управління. Це пов'язано з високими вимогами до мережових систем нового покоління, таких як 6G, а також з успіхом використання алгоритмів штучного інтелекту в інших галузях досліджень. Впровадження алгоритмів штучного інтелекту на фізичному рівні мереж може мати деякі виклики, оскільки цей рівень вимагає розгляду фізичних параметрів, шуму, інтерференції та інших факторів. Однак, з використанням нових підходів та технологій, таких як нейромережі з низькою складністю та оптимізовані алгоритми, досягнення прориву на фізичному рівні стає можливим.

У результаті, методи штучного інтелекту можуть стати перспективним інструментом для вирішення складних проблем у бездротових системах зв'язку, забезпечуючи високу продуктивність, ефективне управління та розвиток нових послуг для користувачів [6].

При розробці фізичного рівня з підтримкою штучного інтелекту можуть бути важливими наступні ключові моменти. Баланс між моделями бездротових систем і підходом алгоритмів штучного інтелекту, заснованим на даних, оскільки використання алгоритмів штучного інтелекту на фізичному рівні мереж потребує збалансованого підходу до використання моделей бездротових систем і підходів, заснованих на аналізі даних. Врахування доменних знань про бездротові системи, а також використання ітеративного циклу навчання і пристосування можуть допомогти досягти оптимального балансу.

Глобальна оптимізація в модульних блоках фізичного рівня, оскільки алгоритми штучного інтелекту
© Васильківський М.В., Нікітович Д.В., Болдирева О.С., Якубівська Н.В.

інтелекту можуть використовуватися для глобальної оптимізації різних модульних блоків на фізичному рівні мереж. Це може включати оптимізацію модуляції, кодування, рівня потужності, оцінки каналу та інших параметрів з метою досягнення кращої продуктивності та ефективності.

Компроміс між ефективністю навчання і продуктивністю, оскільки при використанні алгоритмів штучного інтелекту на фізичному рівні потрібно знайти компроміс між ефективністю навчання моделей і продуктивністю системи. Великі обсяги даних та складні алгоритми можуть вимагати значних обчислювальних ресурсів, тому важливо забезпечити оптимальну продуктивність, використовуючи ефективні алгоритми та апаратне забезпечення [7].

Впровадження алгоритмів штучного інтелекту на фізичному рівні мобільних мереж відкриває нові можливості для вдосконалення різних показників системи зв'язку, таких як пропускна здатність, затримка, енергоефективність і т. д. Замість складних математичних моделей, алгоритми штучного інтелекту можуть використовувати велику кількість навчальних даних для оптимізації системи фізичного рівня. Одним з головних переваг алгоритмів штучного інтелекту є їх здатність виявляти складні взаємозв'язки між входом і виходом без потреби в точних математичних моделях. Вони можуть навчитися з великого обсягу даних і виявляти навіть тонкі залежності, які можуть бути складними для аналізу або моделювання традиційними методами.

Узагальнюючи, використання методів штучного інтелекту у проектуванні фізичного рівня бездротових систем дозволяє досягти наскрізної оптимізації продуктивності та ефективності системи, зменшити затримки та покращити взаємодію між різними блоками. Це сприяє покращенню загальної продуктивності бездротових систем і підвищує їхню здатність відповідати вимогам 5G та 6G комунікаційних стандартів [5].

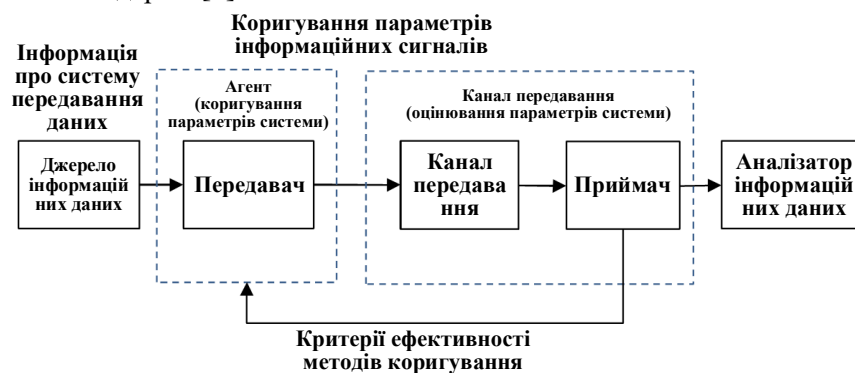


Рис. 1. Структура наскрізного фізичного рівня на основі навчання з підкріпленням

Структура наскрізного фізичного рівня на основі підсиленого навчання (RL) може бути організована за допомогою наступних компонентів. Середовище визначає простір, в якому працює система фізичного рівня. Воно може включати моделі каналу зв'язку, даних про затримки, шуму та інші фактори, що впливають на передачу даних. Середовище також надає можливість взаємодії з агентом. Агент виконує дії в середовищі з метою досягнення певних цілей. В даному випадку, агентом є система фізичного рівня, яка приймає рішення щодо налаштування параметрів передавача, кодування, модуляції, розподілу ресурсів та інших функцій з метою оптимізації продуктивності системи. Стан представляє сукупність інформації, необхідної для прийняття рішення агентом. Це можуть бути дані про канал зв'язку, стан буферів, рівень шуму, поточні налаштування та інші входні параметри. Дії визначають набір можливих кроків, які агент може здійснити у середовищі. Наприклад, це може бути вибір певного кодування, модуляції, або розподілу ресурсів між користувачами. Винагорода відображає оцінку продуктивності агента за виконані дії. Вона може бути задана як функція від параметрів продуктивності системи, таких як пропускна здатність, шум, затримка тощо. Метою агента є максимізація загальної винагороди [6].

Затримка приблизно складається з часу обробки пристроєм 0,3 мс, часу передачі 0,1 мс, часу обробки мережі 0,5 мс та іншого запасу 0,1 мс. Таким чином, алгоритми AI повинні працювати із затримкою менше 0,1 мс. Це зумовлює вищу частоту дискретизації сигналів 6G і більшу обчислювальну потужність для аналізу бездротових каналів, що змінюються в часі [5, 7]. Врахування обмежень затримки є важливим аспектом проектування системи фізичного рівня, особливо в контексті майбутніх мереж 6G. Зазначена затримка включає час обробки пристроєм, час передачі, час обробки мережі та запасний час. Для забезпечення затримки менше 0,1 мс потрібні висока частота дискретизації сигналів і велика обчислювальна потужність.

Методи штучного інтелекту, такі як підсилене навчання, можуть бути використані для

оптимізації фізичного рівня з урахуванням обмежень затримки. Агент може навчитись приймати рішення про налаштування параметрів системи, які мінімізують затримку. Навчання може включати аналіз даних про канал зв'язку, передачу трафіку та інші параметри, щоб визначити оптимальні стратегії передачі даних. Оптимізація обчислювальної потужності також є важливою для забезпечення виконання алгоритмів штучного інтелекту з низькою затримкою. Використання легких платформ та оптимізація алгоритмів можуть допомогти досягти необхідної швидкодії обчислень. Усі ці підходи дозволять досягти вимог щодо затримки у 6G системах та забезпечити ефективну роботу алгоритмів штучного інтелекту на фізичному рівні [8].

Перенесення алгоритмів штучного інтелекту (AI) на базові станції в радіодоступних мережах може бути ефективним рішенням. Оскільки обчислювальна потужність користувацького обладнання обмежена, а робоче навантаження обробки базової смуги вже значне на користувацькому обладнанні, запуск алгоритмів штучного інтелекту безпосередньо на ньому може бути неефективним. Перенесення обробки базового діапазону на базові станції дозволяє використовувати їх більшу обчислювальну потужність та ресурси для виконання складних алгоритмів AI. Це може включати обробку сигналів, декодування, фільтрацію, покращення якості сигналу, мінімізацію перешкод та інші завдання, пов'язані з фізичним рівнем радіодоступу. Перенесення алгоритмів AI на базові станції також може покращити продуктивність мережі та якість обслуговування. Застосування AI може допомогти в розпізнаванні паттернів, прогнозуванні трафіку, управлінні ресурсами, адаптації до змінних умов мережі та багатьох інших завданнях [1].

Однак, при перенесенні алгоритмів AI на базові станції, слід враховувати обмеження щодо обробки та ресурсів, щоб забезпечити оптимальну продуктивність мережі. Крім того, забезпечення безпеки та конфіденційності даних є важливими аспектами при використанні AI в мережах радіодоступу [3]. Розглянемо важливі аспекти, пов'язані з розгортанням алгоритмів штучного інтелекту (AI) в системах 6G та радіодоступних мережах.

В системах 6G важливо мати надійні, знижені затримки та високопропускні бездротові з'єднання між користувацьким обладнанням та периферійними мережами. Це дозволяє ефективно обмінюватися даними між межами радіомереж та інтелектуальними додатками. У системах 6G очікується розширення розподілених обчислень та зберігання даних. Це означає, що обчислення можуть відбуватися на межі радіомереж або ближче до кінцевих користувачів. Забезпечення належного рівня захисту даних стає важливим аспектом в цьому контексті. Алгоритми AI часто працюють на спеціалізованих процесорах, таких як графічні процесори (GPU) або центральні процесори (CPU). У системах 6G, де обчислювальна потужність базового діапазону може бути обмеженою, можуть бути необхідні оптимізовані архітектури, які забезпечують ефективне використання обчислювальних ресурсів, енергії та надійності [4].

З метою прискорення швидкості навчання та ефективної роботи алгоритмів AI в обмежених обчислювальних умовах, варто розробляти легкі платформи з точки зору обчислювальної потужності, енергоефективності та надійності. При розробці алгоритмів AI можна зосередитися на їх оптимізації для максимальної ефективності в обмежених умовах. Це може включати використання менш обчислювально вимогливих моделей, алгоритмів з низькою складністю та оптимізацію параметрів для забезпечення ефективної роботи на легких платформах. Використання спеціалізованих пристроїв або апаратного прискорення, такого як спеціалізовані чіпи або FPGA, може покращити продуктивність алгоритмів AI. Ці пристрої можуть виконувати обчислення більш ефективно та енергоефективно, забезпечуючи оптимальну роботу навіть в умовах з обмеженими обчислювальними ресурсами. Застосування федеративного навчання, де моделі навчаються на розподілених пристроях, може знизити навантаження на окремі платформи. Це дозволяє обмежити обчислювальні потужності та ресурси, використовуючи навчання на локальних пристроях, а потім об'єднувати та обмінюватися результатами навчання [5].

Компроміс між обчислювальною потужністю та точністю є важливим аспектом при розробці легких платформ для алгоритмів AI. Використання менш складних моделей може допомогти знизити обчислювальну потужність, особливо в умовах обмежених ресурсів. Можна розглядати використання легких моделей, таких як MobileNet, EfficientNet, або методів стиснення моделей, таких як прунінг (pruning) та квантизація (quantization), для зменшення обчислювальних вимог. Дистиляція моделей - це процес передачі знань з більш складних моделей на менш складні. Використання цього підходу дозволяє зменшити обчислювальні вимоги, зберігаючи при цьому певний рівень точності. Більш складні моделі можуть бути навчені спочатку, а потім їх знання можуть бути передані на менш складні моделі, які використовуються на легких платформах. Іноді, для забезпечення ефективної роботи на легких платформах, може бути необхідно зробити

© Васильківський М.В., Нікітович Д.В., Болдирева О.С., Якубівська Н.В.

компроміс щодо точності моделі. Зниження точності може бути прийнятним, особливо якщо це не суттєво впливає на кінцеві результати або вимоги застосування. При цьому слід ретельно збалансувати зниження точності, щоб досягти оптимального співвідношення між точністю та обчислювальною потужністю [6].

Розробка легких платформ з точки зору обчислювальної потужності, енергоефективності та надійності є важливим для прискорення швидкості навчання та ефективної роботи алгоритмів штучного інтелекту (AI) в системах 6G. Розглянемо основні аспекти, які слід враховувати при розробці таких платформ. Легкі платформи повинні мати оптимізовану обчислювальну архітектуру, яка забезпечує ефективне використання ресурсів обчислювальної потужності. Це може включати використання спеціалізованих пристроїв, таких як GPU або CPU з підтримкою оптимізованих бібліотек для виконання операцій машинного навчання. Умови обмеженої обчислювальної потужності вимагають розробки енергоефективних платформ. Це може бути досягнуто шляхом оптимізації алгоритмів та апаратних компонентів, які забезпечують оптимальне використання енергії при виконанні обчислень. Висока надійність бездротових з'єднань між користувацьким обладнанням і периферійними мережами є важливою у системах 6G. Легкі платформи повинні мати надійні механізми забезпечення стабільного зв'язку та передачі даних, щоб забезпечити ефективну роботу алгоритмів AI в реальному часі. У системах 6G важливо підтримувати розподілені обчислення і зберігання даних для забезпечення швидкості навчання та ефективної роботи алгоритмів AI. Розподілені обчислення дозволяють розподіляти обчислювальне навантаження між різними вузлами мережі, забезпечуючи паралельну обробку даних. Це дозволяє збільшити швидкість навчання та роботи алгоритмів AI, оскільки завдання можуть бути розподілені і виконуватися паралельно на декількох вузлах [7].

Крім того, розподілене зберігання даних дозволяє зберігати великі обсяги даних у розподіленій формі на різних вузлах мережі. Це забезпечує більш ефективний доступ до даних для обробки, оскільки дані можуть бути розподілені та розподілятися між вузлами в залежності від потреби. Такий підхід дозволяє знизити затримки при доступі до даних і підвищити продуктивність обробки. Однак, для забезпечення розподілених обчислень і зберігання важливо враховувати достатній рівень захисту даних. У системах 6G, де обробка даних та передача інформації відбуваються у високошвидкісних бездротових мережах, важливо захищати дані від несанкціонованого доступу та забезпечувати конфіденційність та цілісність даних.

Отже, розподілені обчислення і зберігання є важливими складовими систем 6G для прискорення швидкості навчання та ефективної роботи алгоритмів AI. Вони дозволяють розподілити обчислювальне навантаження та зберігати дані у розподіленій формі, що забезпечує підвищення продуктивності та зниження затримок [8].

Спільне проектування апаратного та програмного забезпечення (HW-SW co-design) є цікавим підходом до реалізації алгоритмів штучного інтелекту (AI). Цей підхід передбачає тісну взаємодію між апаратним та програмним забезпеченням на ранніх етапах розробки, що дозволяє оптимізувати продуктивність та ефективність системи. Проектування апаратного забезпечення та алгоритмів AI одночасно дозволяє враховувати особливості обох аспектів ще до фізичної реалізації системи. Це означає, що вже на етапі проектування можна врахувати оптимальну структуру та конфігурацію апаратного забезпечення, яка найкраще підходить для виконання конкретних алгоритмів AI.

Спільне проектування також дозволяє проводити ітеративний процес оптимізації, де програмне та апаратне забезпечення взаємодіють між собою та вдосконалюються на основі взаємних вимог і характеристик. Це дозволяє досягти більшої продуктивності та ефективності системи, зменшити затримки та забезпечити оптимальне використання обчислювальних ресурсів. Однак, спільне проектування апаратного та програмного забезпечення також може створити виклики, оскільки потребує глибоких знань та експертизи в обох областях. Крім того, вимоги до забезпечення сумісності, стандартизації та взаємодії між апаратним та програмним забезпеченням можуть впливати на процес розробки та час виконання проекту [1].

Спільне проектування апаратного та програмного забезпечення (HW-SW co-design) дійсно включає кілька кроків для ефективної реалізації системи фізичного рівня.

Специфікація системи і визначення архітектури фізичного рівня. Цей крок полягає в визначенні завдань фізичного рівня та опису їх поведінки. Уніфіковані представлення, такі як графи потоків даних та мережі Петрі, можуть бути використані для опису завдань фізичного рівня, які можуть бути реалізовані як апаратне, так і програмне забезпечення.

Розбиття HW-SW. Цей крок визначає розподіл функціональності між апаратним і програмним забезпеченням. Метою є проектування системи фізичного рівня для задоволення вимог при
© Васильківський М.В., Нікітович Д.В., Болдирева О.С., Якубівська Н.В.

обмеженнях. Це може бути складною задачею оптимізації, яку можна вирішити за допомогою конструктивних або ітераційних алгоритмів.

Розробка інтерфейсу HW/SW. Цей крок включає визначення інтерфейсів між апаратним та програмним забезпеченням, що дозволяє їм взаємодіяти та обмінюватися даними.

Спільний синтез та верифікація. Цей етап включає спільну оптимізацію та верифікацію апаратного та програмного забезпечення. Він вимагає використання інструментів автоматизації електронного проектування (EDA) для підтримки цих процесів.

Ефективне спільне проектування апаратного та програмного забезпечення має кілька переваг, які можуть призвести до покращення продуктивності системи, зниження витрат і скорочення циклу розробки. Спільне проектування дозволяє глибоко інтегрувати апаратне та програмне забезпечення, що може призвести до оптимального використання апаратних ресурсів і покращення продуктивності системи в цілому. Під час спільного проектування можуть бути використані оптимізаційні методи, які враховують взаємодію між апаратним і програмним забезпеченням. Спільне проектування дозволяє ефективно використовувати ресурси і уникати надмірного дублювання функцій. Це може призвести до зниження вартості розробки, виробництва і обслуговування системи. В спільному проектуванні HW-SW апаратне та програмне забезпечення розробляються паралельно, що дозволяє скоротити час розробки. Взаємодія між командами апаратного та програмного проектування може призвести до швидшого впровадження системи на ринок. Спільне проектування дозволяє вирішувати складні проблеми, що стосуються взаємодії між апаратним і програмним забезпеченням, в одному процесі. Це сприяє досягненню кращої збалансованості між функціональністю, продуктивністю, енергоефективністю та іншими вимогами системи [2].

Оптимізація використання апаратних ресурсів та розподіл завдань є ключовими елементами для досягнення ефективної реалізації алгоритмів штучного інтелекту. Оптимізація використання апаратних ресурсів полягає в тому, щоб використовувати доступні апаратні компоненти та ресурси (наприклад, GPU, спеціалізовані пристрої для прискорення обчислень) настільки ефективно, наскільки це можливо. Це може включати в себе розробку оптимізованого програмного коду, використання спеціалізованих бібліотек або фреймворків для виконання обчислень на апаратних пристроях та використання технік, таких як паралелізація та векторизація, для забезпечення максимальної продуктивності.

Розподіл завдань між апаратним і програмним забезпеченням також важливий для ефективної реалізації алгоритмів штучного інтелекту. Це означає розподіл завдань, таких як обчислення, обробка даних та управління, між апаратними та програмними компонентами системи. Розподіл може бути здійснений залежно від вимог до продуктивності, обмежень апаратних ресурсів та особливостей алгоритму. Наприклад, інтенсивні обчислення можуть бути виконані на спеціалізованих апаратних пристроях, а управління та обробка даних - на програмних компонентах. Загальна мета оптимізації використання апаратних ресурсів та розподілу завдань полягає в забезпеченні оптимальної продуктивності системи штучного інтелекту, зниженні витрат на апаратне забезпечення [3].

Розробка нових алгоритмів штучного інтелекту для функцій фізичного рівня дозволяє забезпечити баланс між обчислювальною складністю та точністю. Традиційні методи, які використовуються для обробки сигналів на фізичному рівні, можуть бути досить складними та вимагати значних обчислювальних ресурсів. Однак, розвиток нових алгоритмів AI дозволяє вирішити цю проблему, шукаючи компроміс між продуктивністю та обчислювальною складністю.

При розробці нових алгоритмів AI для функцій фізичного рівня можна використовувати евристичні методи та налаштовувати параметри з метою досягнення оптимального результату. Це означає, що розробники бездротових систем можуть вибирати такі параметри алгоритмів, які забезпечують достатню точність результату при мінімальній обчислювальній складності. Такий підхід дозволяє досягти ефективності роботи алгоритмів AI, забезпечуючи відповідну продуктивність системи.

Окрім того, розробники можуть використовувати нові техніки та алгоритми, які забезпечують більш ефективну роботу з обчислювальними ресурсами. Наприклад, використання оптимізованих алгоритмів машинного навчання, які можуть працювати з обмеженими ресурсами, або впровадження спеціалізованих апаратних пристроїв, таких як FPGA або ASIC, може значно покращити продуктивність і ефективність роботи системи [4].

Таким чином, розробка нових алгоритмів штучного інтелекту для функцій фізичного рівня може допомогти досягнути балансу між продуктивністю і обчислювальною складністю. Традиційні
© Васильківський М.В., Нікітович Д.В., Болдирева О.С., Якубівська Н.В.

методи, які базуються на максимальній правдоподібності, максимальній апостеріорності, мінімальній середньоквадратичній похибці та інших критеріях, можуть бути обчислювально витратними. Алгоритми штучного інтелекту можуть забезпечити більш ефективне використання апаратних ресурсів і зниження обчислювальної складності. Розробка нових алгоритмів AI може включати в себе застосування методів машинного навчання, глибокого навчання, еволюційних алгоритмів та інших підходів, які дозволяють автоматично налаштовувати параметри алгоритмів на основі навчальних даних або евристичних правил. Це дозволяє досягти оптимальних рішень з точністю, яка задовольняє вимоги фізичного рівня, при меншому обчислювальному навантаженні [5]. Крім того, розробка нових алгоритмів AI може включати в себе спеціалізовані оптимізаційні техніки, такі як оптимізація апаратних архітектур, розподілені обчислення, паралельні обчислення та інші підходи, які дозволяють ефективно використовувати обчислювальні ресурси і забезпечувати високу продуктивність.

Евристичні підходи до налаштування параметрів можуть бути нестабільними і не завжди забезпечують хороший компроміс у змінних умовах. Тут алгоритми штучного інтелекту можуть вносити значний внесок, сприяючи покращенню проблеми налаштування параметрів за допомогою навчання та глибокого навчання. Використання алгоритмів штучного інтелекту, які ґрунтуються на великому наборі даних, може сприяти впровадженню нових функцій у системи 6G. Аналіз великих даних може допомогти передбачити майбутні стани системи, покращити дизайн, виявляти несправності та встановлювати оптимальну конфігурацію. Використання добре навчених моделей фізичного рівня може поліпшити наскрізний ланцюг зв'язку і досягти глобальної оптимальної побудови [6].

Однак, виправність алгоритмів штучного інтелекту сильно залежить від доступу до великого обсягу якісних даних. Збір даних з систем стільникового зв'язку є критичним для продуктивності алгоритмів штучного інтелекту, і важливо добре відбирати та обробляти набори даних для досягнення високої точності і надійності алгоритмів. Отже, використання алгоритмів штучного інтелекту разом з великими наборами даних може допомогти розробникам систем стільникового зв'язку забезпечити баланс між продуктивністю, точністю та адаптивністю до змінних умов.

Набір даних, що генерується фізичним рівнем, містить важливу інформацію про характеристики каналу та завади, які можуть впливати на передачу радіоданих. Витягнення цих характеристик та коригування параметрів передачі можуть бути виконані за допомогою алгоритмів штучного інтелекту.

Застосування алгоритмів штучного інтелекту, які ґрунтуються на даних, дозволить отримати нові можливості для проектування фізичного рівня. Це означає, що алгоритми штучного інтелекту для фізичного рівня мають бути розроблені з урахуванням конкретних особливостей та середовища фізичного рівня.

Шляхом аналізу наборів даних, які включають інформацію про погіршення каналу в часовій, частотній і просторовій областях можливо отримати важливі характеристики радіоданих та дані про завади. Ці характеристики можуть бути використані для коригування параметрів передачі, таких як потужність передачі, напрямки формування променя, спектр, модуляція [7]. В результаті, забезпечується можливість покращити продуктивність і надійність передачі радіоданих у змінних умовах каналу.

При цьому, для досягнення оптимальних результатів, рекомендується розробляти алгоритми штучного інтелекту для фізичного рівня з урахуванням конкретного середовища фізичного рівня, у якому вони будуть застосовуватись.

Алгоритми штучного інтелекту можуть бути використані для покращення та поєднання з алгоритмами фізичного рівня. Виправлені алгоритми штучного інтелекту можуть бути пристосовані до вирішення завдань фізичного рівня, зокрема в областях класифікації, кластеризації, регресії та прийняття рішень. Неконтрольоване навчання може бути застосоване для виявлення структур і закономірностей в даних фізичного рівня без використання маркованих даних. Це може допомогти витягти корисну інформацію з даних та розробити модель фізичного рівня.

Навчання під наглядом може бути використане для побудови моделей фізичного рівня з використанням маркованих даних. Ці моделі можуть допомогти прогнозувати майбутні дані та знаходити закономірності в фізичних процесах. Навчання з підкріпленням може бути застосоване для навчання агента взаємодіяти з фізичним середовищем, максимізуючи винагороду. Це може бути корисним для оптимізації послідовності дій агента в фізичному середовищі та досягнення мети. Глибоке навчання може імітувати людський мозок і використовувати великі обсяги даних для виявлення закономірностей. Це може бути важливим для аналізу даних фізичного рівня та

витагнення корисної інформації [8].

Адаптація алгоритмів штучного інтелекту до фізичного рівня може забезпечити покращення продуктивності алгоритмів та моделей фізичного рівня. Використання методів навчання алгоритмів штучного інтелекту в контексті фізичного рівня може привести до таких переваг.

Алгоритми штучного інтелекту можуть ефективно виявляти закономірності та робити прогнози на основі великого обсягу даних фізичного рівня. Це дозволяє покращити продуктивність системи та оптимізувати функції фізичного рівня. Алгоритми штучного інтелекту можуть приймати рішення на основі навчання та оптимізації, що допомагає забезпечити більш ефективне використання ресурсів та покращити якість обслуговування. Наприклад, можна використовувати алгоритми навчання з підкріпленням для оптимального керування передачею сигналу в залежності від змінних факторів каналу. Використання алгоритмів штучного інтелекту дозволяє автоматизувати процеси обробки та аналізу даних на фізичному рівні. Це допомагає зменшити вплив людського фактора, забезпечити більшу швидкість та точність обробки даних, а також забезпечити більшу реалізацію на масштабах систем 6G. Алгоритми штучного інтелекту можуть допомогти в налаштуванні та оптимізації параметрів фізичного рівня для досягнення балансу між продуктивністю та розумною точністю. Шляхом навчання на великому обсязі даних, алгоритми можуть виявляти оптимальні налаштування та параметри, що забезпечують ефективну роботу системи [1].

Кластеризація методом К-середнього може бути корисною для аналізу спектра, розподілу потужності та вибору релейних вузлів. Шляхом групування даних на основі їх схожості, кластеризація допомагає виділити підгрупи чи кластери, що можуть мати спільні характеристики чи функції. Розбиття ланцюжка блоків на незалежні компоненти на фізичному рівні є хорошим підходом для розробки та оптимізації системи передачі сигналу. Кожен компонент блок-ланцюга може виконувати певну функцію, а їх незалежність дозволяє легше розробляти, тестувати та модифікувати окремі частини системи.

Моделювання каналів є важливим аспектом досліджень фізичного рівня. Застосування алгоритмів штучного інтелекту до моделювання каналів може допомогти отримати більш точні та реалістичні моделі на основі великого обсягу даних вимірювань. Використання ключових характеристик каналу дозволяє спростити модель та забезпечити достатню точність при моделюванні. Врахування компромісу між точністю моделі та припущеннями є важливим аспектом при традиційному моделюванні каналів. Використання алгоритмів штучного інтелекту може допомогти автоматизувати процес пошуку оптимального компромісу шляхом аналізу великої кількості даних та знаходження оптимальних параметрів моделі. Застосування алгоритмів штучного інтелекту до фізичного рівня дозволяє покращити точність, ефективність та автоматизацію аналізу даних [2].

Алгоритми штучного інтелекту можуть бути корисними для передбачення втрат при передаванні даних, імпульсної характеристики каналу та моделювання поширення сигналу в гетерогенних мережах 6G. Застосування алгоритмів штучного інтелекту дозволяє вивчати складні ключові ознаки сигналів у зашумлених каналах, що дозволяє розрізняти більшу кількість пристроїв і покращує точність класифікації форм сигналів.

Алгоритми фізичного рівня, які базуються на оптимізації, можуть бути обмежені, якщо їх припущення моделі не відповідають реальним умовам бездротових систем або каналу. Традиційні алгоритми фізичного рівня можуть бути ефективними в обмежених умовах, але втрачають оптимальну продуктивність, коли умови стають складнішими, наприклад, в середовищах з високою мобільністю. Алгоритми штучного інтелекту, зокрема ті, що використовують оптимізацію на основі даних та методи градієнтного спуску, можуть адаптуватися до реальних умов і виконувати тонку настройку параметрів в режимі реального часу. Це дозволяє їм досягати оптимальної продуктивності навіть в змінних та складних умовах бездротових систем [3]. Таким чином, поєднання алгоритмів штучного інтелекту з алгоритмами фізичного рівня може покращити продуктивність та адаптивність систем передачі сигналу, дозволяючи використовувати складніші моделі та оптимально налаштовувати параметри в режимі реального часу.

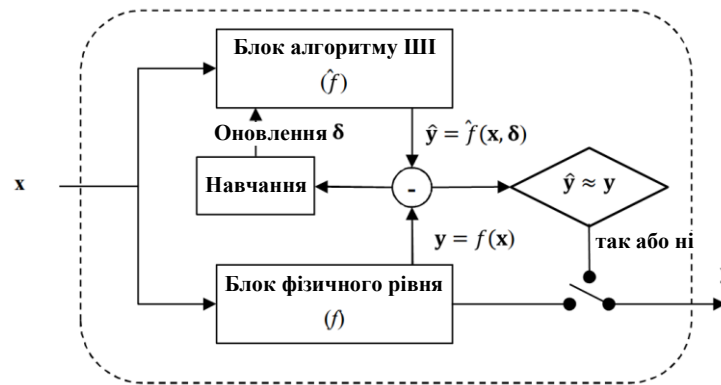


Рис. 2. Модель блоку фізичного рівня мережі із генеративним штучним інтелектом

Архітектура компонента фізичного рівня, що підтримує штучний інтелект, може бути організована у вигляді моделі, яка поєднує техніки фізичного рівня та алгоритми AI. Компонент фізичного рівня отримує вхідні дані, які можуть бути сигналами з датчиків, характеристиками каналу, параметрами передачі. Ці дані слугують основою для подальшого аналізу та обробки.

Вхідні дані можуть потребувати попередньої обробки, такої як фільтрація, підсилення сигналу, нормалізація тощо. Це може покращити якість даних та забезпечити оптимальні умови для подальшого аналізу. Застосування алгоритмів AI дозволяє витягнути корисні ознаки з вхідних даних. Це може включати в себе використання методів навчання глибоких нейронних мереж, автоенкодерів, згорткових мереж та інших технік для автоматичного виявлення ключових характеристик даних. На основі витягнутих ознак та використання алгоритмів AI, компонент фізичного рівня може побудувати моделі для прогнозування, класифікації або регресії. Ці моделі можуть передбачати різні характеристики або властивості фізичного рівня, такі як втрати на проходження сигналу, імпульсні характеристики каналу, розподіл потужності [4].

Використання алгоритмів штучного інтелекту може значно покращити блоки фізичного рівня, зменшити час і складність обчислень та знайти оптимальні рішення. Розглянемо деталізацію трьох основних підходів до покращення блоків фізичного рівня за допомогою алгоритмів AI.

Підтримка кожного блоку фізичного рівня. В цьому підході алгоритми AI використовуються для покращення та оптимізації кожного окремого блоку фізичного рівня. Наприклад, можуть використовуватись алгоритми навчання з підкріпленням для оптимізації параметрів передавача або приймача, алгоритми навчання глибоких нейронних мереж для покращення каналу зв'язку тощо. Цей підхід дозволяє досягнути оптимальних рішень для кожного окремого блоку, прискорити збіжність та зменшити час обчислень. Інший підхід полягає в застосуванні алгоритмів AI для ітеративного та адаптивного вирішення проблем фізичного рівня. Наприклад, можуть використовуватись алгоритми оптимізації на основі даних для пошуку оптимальної точки в просторі параметрів блоків фізичного рівня. Це дозволяє швидко знаходити оптимальні рішення, адаптуватись до змінних умов та забезпечувати гнучкість в реальному часі. Алгоритми AI можуть бути використані для зменшення складності обчислень у блоках фізичного рівня. Наприклад, можуть використовуватись методи зменшення розмірності даних, відбір ознак або компресія даних, які дозволяють зберігати та обробляти меншу кількість інформації без суттєвої втрати точності. Це дозволяє знизити обчислювальну складність алгоритмів фізичного рівня, що прискорює їх роботу і забезпечує більш ефективне використання ресурсів [5].

Такі методи можуть включати у себе методи головних компонентів (PCA), які дозволяють зменшити розмірність даних шляхом знаходження головних напрямків варіації, або методи відбору ознак, які ідентифікують найбільш інформативні ознаки та виключають незначущі. Це сприяє покращенню продуктивності алгоритмів фізичного рівня, зменшенню вимог до ресурсів та забезпеченню ефективної обробки даних у реальному часі.

Як видно з рис. 2, вхідні дані x подаються як на блок фізичного рівня, так і на блок алгоритмів AI. Обидва функціональні блоки можуть бути виражені як блок фізичного рівня: $y = f(x)$ та блок алгоритму AI: $\hat{y} = \hat{f}(x, \delta)$, де δ , $\hat{y}$ та y - параметри алгоритму AI параметри алгоритму AI, вихід блоку алгоритму AI та вихід блоку фізичного рівня відповідно. По-перше, ми навчаємо блок алгоритму AI в певний час на вхідному наборі навчальних даних, порівнюючи виходи обох блоків. По-друге, ми оновлюємо параметри блоку алгоритму AI δ . Якщо ми маємо навчений блок алгоритму AI, ми можемо покращити блок фізичного рівня, порівнюючи виходи між ними.

Другий підхід полягає у включенні блоку алгоритму штучного інтелекту (ШІ) як додаткового

блоку до компонента фізичного рівня. Цей блок ШІ може аналізувати вхідні дані, вивчати їх особливості та виконувати певні обчислення для покращення роботи компонента фізичного рівня [6]. Наприклад, за допомогою нейронних мереж, генетичних алгоритмів або інших методів ШІ, блок фізичного рівня може оптимізувати свої внутрішні параметри або адаптуватися до змінних умов каналу. Це дозволяє покращити продуктивність та адаптивність компонента фізичного рівня, забезпечуючи більш точну обробку даних та ефективне використання ресурсів. Такий підхід також може включати в себе використання алгоритмів навчання з підкріпленням, де блок ШІ може взаємодіяти з оточенням, отримувати нагороду за правильні дії та покращувати свої стратегії на основі отриманих відгуків. Цей підхід дозволяє компоненту фізичного рівня використовувати знання та інтелектуальні можливості ШІ для покращення своєї продуктивності та адаптивності у реальному часі, як показано на рис. 3.

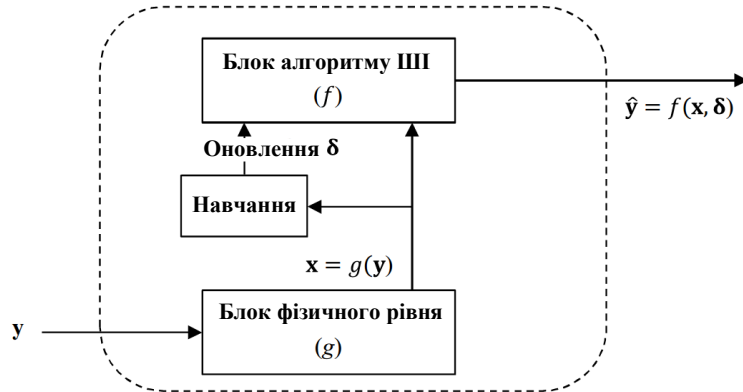


Рис. 3. Модель взаємодії блоку фізичного рівня мережі із алгоритмом штучного інтелекту

На фізичному рівні існує багато нелінійних і непередбачуваних спотворень, таких як нелінійний підсилювач потужності. Зазвичай вони моделюються невідомою функцією. Ми маємо спотворений вихід $x = g(y)$ від невідомої функції. Спотворення оцінюється і компенсується функцією інверсії [7].

Як ми бачимо на рис. 3, блок алгоритму АІ може діяти як функція інверсії. У блоці алгоритму АІ виконується навчання, оновлюється параметр алгоритму АІ δ і створюється модель функції інверсії. Навчений блок алгоритмів АІ зменшує похибки апроксимації та досягає оптимального вигляду функції інверсії.

Третій підхід може включати поєднання компонента фізичного рівня та блоку алгоритму штучного інтелекту (АІ) або заміну компонента фізичного рівня на блок алгоритму АІ, як показано на рис. 4. Розглянемо два можливих сценарії цього підходу. Поєднання компонента фізичного рівня та блоку алгоритму АІ.

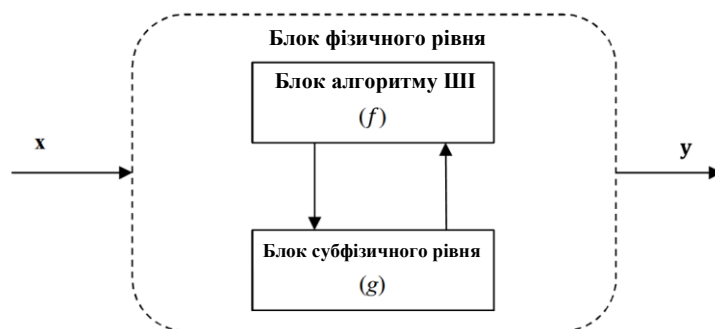


Рис. 4. Модель блоку фізичного рівня із вбудованим алгоритмом ШІ

У цьому сценарії компонент фізичного рівня залишається основною частиною системи, але він поєднується з блоком алгоритму АІ. Блок АІ може використовуватись для покращення певних аспектів фізичного рівня, наприклад, для оптимізації параметрів або покращення якості передачі сигналу. В цьому випадку блок АІ може аналізувати вхідні дані, навчатись на основі знань та оптимізувати роботу компонента фізичного рівня. Поєднання обчислювальних можливостей АІ з фізичними обчисленнями може покращити продуктивність системи. Заміна компонента фізичного рівня на блок алгоритму АІ. У цьому сценарії компонент фізичного рівня може бути замінений або значно змінений за допомогою блоку алгоритму АІ. Заміна компонента фізичного рівня АІ може включати в себе використання нейронних мереж, глибокого навчання та інших методів АІ для виконання фізичних операцій. Це може привести до більш гнучкої, адаптивної та ефективної

системи. Однак, важливо враховувати, що заміна компонента фізичного рівня на блок AI може вимагати значних обчислювальних ресурсів і тривалого процесу навчання [8].

Багато підфункцій блоку фізичного рівня вже використовують концепцію ітерації та адаптації для досягнення оптимальних результатів. Проте, застосування нових алгоритмів штучного інтелекту (AI) може покращити ці підфункції ще більше. Нові алгоритми AI можуть використовувати методи оптимізації, навчання з підкріпленням або глибокого навчання для покращення роботи блоку фізичного рівня. Вони можуть автоматично адаптуватися до змінних умов каналу передачі даних, компенсувати спотворення, шум та інші фактори, що впливають на якість сигналу. Це може призвести до зменшення складності і часу ітерацій, що вимагаються для досягнення оптимального рішення [1].

Оптимізація підфункцій блоку фізичного рівня за допомогою алгоритмів AI дозволяє більш ефективно компенсувати спотворення, покращувати якість сигналу і забезпечувати більш точну передачу даних. Це може мати значний вплив на продуктивність та надійність системи передачі даних. Проте, варто враховувати, що використання нових алгоритмів AI може вимагати деяких додаткових зусиль і ресурсів. Навчання моделей AI може вимагати великої кількості даних та обчислювальної потужності. Крім того, розробка та налагодження таких систем можуть вимагати спеціалізованого експертного знання і часу [2].

Крім того, важливо бути уважним щодо можливих викликів та обмежень, пов'язаних з використанням алгоритмів AI. Наприклад, виникають питання етики та конфіденційності, оскільки обробка даних за допомогою AI може вимагати доступу до великого обсягу особисто ідентифікованої інформації. Також потрібно забезпечити, щоб система AI була надійною та стійкою до атак, оскільки вона може стати точкою вразливості у системі.

Необхідно бути обережним при впровадженні нових алгоритмів AI в компоненти фізичного рівня, забезпечити адекватне тестування та перевірку їх працездатності. Впровадження AI вимагає збалансованого підходу та ретельного аналізу, щоб досягти позитивного впливу на ефективність системи передачі даних.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Алгоритми генеративного штучного інтелекту можуть бути використані для підвищення продуктивності фізичного рівня бездротових систем шляхом оптимізації функціональних параметрів та адаптації до змінних умов експлуатації тракту передавання. Технологія генеративного штучного інтелекту дозволяє створювати моделі, які можуть генерувати нові, оптимальні рішення на основі великого обсягу даних та правил.

Перенесення алгоритмів штучного інтелекту на базові станції мереж радіодоступу має декілька переваг. Базові станції мають зазвичай більше обчислювальних ресурсів порівняно з користувацьким обладнанням, що дозволяє їм виконувати складні алгоритми AI більш ефективно. Запуск алгоритмів AI на базових станціях дозволяє зменшити робоче навантаження на користувацьке обладнання, оскільки вони можуть передавати лише оброблені результати або прості команди замість повноцінних алгоритмів. Використання алгоритмів AI на базових станціях може допомогти в розпізнаванні паттернів трафіку, управлінні ресурсами та оптимізації мережевих процесів, що може призвести до покращення продуктивності мережі та забезпечення кращої якості обслуговування. Перенесення алгоритмів AI на базові станції дозволяє приймати рішення на місці, без необхідності передавати дані на віддалені сервери для обробки. Це може скоротити затримки і покращити реакцію мережі на зміни умов.

Враховуючи ці переваги, перенесення алгоритмів AI на базові станції може бути ефективним рішенням для поліпшення продуктивності та якості обслуговування в радіодоступних мережах. Однак, слід враховувати обмеження ресурсів базових станцій. ГШІ може використовуватись для оптимізації параметрів бездротової системи з метою покращення продуктивності. Він може аналізувати дані профілю користувача, такі як фізична форма, стиль життя, харчування та інші фактори, і рекомендувати оптимальні параметри для досягнення найкращих результатів. Також ГШІ може використовуватись для виявлення шаблонів у фізичних даних, отриманих з бездротових систем. Він може аналізувати дані про тренування, результати фізичних вправ, біометричні показники та інші фактори, щоб ідентифікувати зв'язки між різними факторами та продуктивністю. На основі цього аналізу можуть бути розроблені алгоритми, які допомагатимуть оптимізувати фізичні тренування та підвищувати продуктивність. ГШІ може допомагати розробляти оптимальні плани тренувань для досягнення конкретних фізичних цілей. Враховуючи фізичну форму, часові обмеження, доступні ресурси та інші фактори, ГШІ може розробити індивідуальні плани тренувань, які дозволяють досягти максимальної продуктивності телекомунікаційних систем. В результаті, забезпечуються передумови для підвищення швидкості

© Васильківський М.В., Нікітович Д.В., Болдирева О.С., Якубівська Н.В.

передачі даних в мережі до 1 Тбіт/секунду та зменшення затримки до менше 1 мілісекунди.

Список бібліографічного опису

1. R. He, B. Ai, A.F. Molisch, G.L. Stuber, Q. Li, Z. Zhong, J. Yu, Clustering enabled wireless channel modeling using big data algorithms. *IEEE Commun. Mag.* 56(5), 177–183 (2018)
2. S. Rajendran, W. Meert, D. Giustiniano, V. Lenders, S. Pollin, Deep learning models for wireless signal classification with distributed lowcost spectrum sensors. *IEEE Trans. Cognitive Commun. Netw.* 4(3), 433–445 (2018)
3. T.J. O'Shea, T. Roy, T.C. Clancy, Over-the-air deep learning based radio signal classification. *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.* 12(1), 168–179 (2018)
4. O. Shental, J. Hoydis, Machine LLRning: Learning to softly demodulate, in *IEEE Globecom Workshops 2019, HI, USA* (2019), pp. 1–7
5. Y. Wang, S. Member, M. Liu, Data-driven deep learning for automatic modulation. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 68(4), 4074–4077 (2019)
6. Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2022). Дослідження архітектури штучного інтелекту для інфокомунікаційних мереж 6G. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 62–70. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-7>
7. Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2022). Інтелектуальна оптимізація інфокомунікаційних мереж множинного доступу. *Вісник Хмельницького національного університету*, (6), 32–39. [https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6\(2\)-32-39](https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6(2)-32-39)
8. Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2023). Інтелектуальний радіоінтерфейс з підтримкою штучного інтелекту. *Вісник Хмельницького національного університету*, (1), 26–32. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-26-32>
9. Васильківський, М., Прикмета, А., Олійник, А., & Нікітович, Д. (2023). Оптимізація інтелектуальних телекомунікаційних мереж. *Вісник Хмельницького національного університету*, (1), 33–41. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-33-41>
10. Васильківський, М., Болдирева, О., Варгатюк, Г., & Будах, М. (2023). Керування телекомунікаційними мережами з використанням технологій AI/ML. *Measuring and computing devices in technological processes*, (1), 89–100. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-73-1-13>
11. Васильківський, М., Болдирева, О., Онищук, Д., & Гнатенко, Ю. (2023). Динамічна інформаційна мережа із вбудованим штучним інтелектом. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, (50), 36–45. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-05>

References

1. R. He, B. Ai, A.F. Molisch, G.L. Stuber, Q. Li, Z. Zhong, J. Yu, Clustering enabled wireless channel modeling using big data algorithms. *IEEE Commun. Mag.* 56(5), 177–183 (2018)
2. S. Rajendran, W. Meert, D. Giustiniano, V. Lenders, S. Pollin, Deep learning models for wireless signal classification with distributed lowcost spectrum sensors. *IEEE Trans. Cognitive Commun. Netw.* 4(3), 433–445 (2018)
3. T.J. O'Shea, T. Roy, T.C. Clancy, Over-the-air deep learning based radio signal classification. *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.* 12(1), 168–179 (2018)
4. O. Shental, J. Hoydis, Machine LLRning: Learning to softly demodulate, in *IEEE Globecom Workshops 2019, HI, USA* (2019), pp. 1–7
5. Y. Wang, S. Member, M. Liu, Data-driven deep learning for automatic modulation. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 68(4), 4074–4077 (2019)
6. Vasylykivskyi M., Varhatiuk, H., & Boldyreva, O. (2022). Doslidzhennya arkhitektury shtuchnoho intelektu dlya infokomunikatsiynykh merezh 6G. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 62–70. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-7>
7. Vasylykivskyi M., Varhatiuk, H., & Boldyreva, O. (2022). Intel'ktual'na optymizatsiya infokomunikatsiynykh merezh mnozhynnoho dostupu. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu*, (6), 32–39. [https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6\(2\)-32-39](https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6(2)-32-39)
8. Vasylykivskyi M., Varhatiuk, H., & Boldyreva, O. (2023). Intel'ktual'nyy radiointerfeys z pidtrymkoyu shtuchnoho intelektu. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu*, (1), 26–32. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-26-32>
9. Vasylykivskyi, M., Prykmeta, A., Oliynyk, A., & Nikitovych, D. (2023). Optymizatsiya intel'ktual'nykh telekomunikatsiynykh merezh. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu*, (1), 33–41. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-33-41>
10. Vasylykivskyi M., Boldyreva, O., Varhatiuk, H., & Budash, M. (2023). Keruvannya telekomunikatsiynymy merezhamy z vykorystanniam tekhnolohiy AI/ML. *Measuring and computing devices in technological processes*, (1), 89–100. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-73-1-13>
11. Vasylykivskyi, M., Boldyreva, O., Onyshchuk, D., & Hnatenko, Y. (2023). Dynamichna informatsiyna merezha iz vbudovanyim shtuchnym intelektom. *Komp'yuterno-intehrovani tekhnolohiyi: osvita, nauka, vyrobnytstvo*, (50), 36–45. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-05>

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-20>

УДК 004.35

Жеребець Олександр Михайлович, начальник відділу

<https://orcid.org/0000-0002-2059-2045>

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, м. Київ, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РІЗНИХ ВЕРСІЙ BLUETOOTH: ПЕРЕВАГИ, НЕДОЛІКИ

Жеребець О.М. Порівняльний аналіз різних версій Bluetooth: переваги, недоліки. У статті проведено порівняльний аналіз різних версій Bluetooth. Здійснено аналіз процесу створення технології та описано генезис. Сформовано поняття та умови реалізації бездротової технології передачі даних Bluetooth. Детально описано процес встановлення зв'язку та запропоновано механізм відокремлення вузлів мережі, які є головними тобто тими, що транслюють та вторинними тобто тими, що приймають інформацію. Схематично представлено спеціальну комп'ютерну мережу передачі даних за технологією Bluetooth та запропоновано розсіяну мережу із застосуванням новітніх технологій. Описано протокольний стек технології з відокремленням чотирьох рівнів, які є основою. Визначено сферу застосування Bluetooth з описом принципів реалізації. Проведено аналіз кожної окремої версії Bluetooth починаючи з 1999 року, так зазначається, що перша версія була заміною серійного порту комп'ютера RS-232 та основна функціональність версії Bluetooth 1.0 полягала у максимальній швидкості передачі даних близько 732,2 Кб/с, а дистанція підключення становила 10 м. Друга версія посприяла більш ширшому розширенню технології з покращеною швидкістю передачі даних до 3 Мбіт/с. та підвищенням діапазону дії до 30 м. Версія 3 отримала можливість підключення до Wi-Fi, що дозволило підвищити швидкість передачі даних, зокрема аудіо даних. Bluetooth 4.0 отримав Bluetooth Low Energy (BLE) або Bluetooth Smart чим розширив власну функціональність, діапазон дії виріс до 100 м., також відбулося покращення зв'язування та повторного зв'язування пристроїв, збільшення ємності пакетів та діапазону даних для пристроїв Інтернету речей. Bluetooth 5.2 дозволяє одночасно передавати два різних джерела звуку на два різні аудіопристрої, тож двоє або кілька людей можуть слухати два різних жанри музики, але потоково з одного пристрою. Покращення функцій Bluetooth 5.3 полягають у покращенні класифікації каналів; наявності функції віднімання з'єднання та покращення в управлінні розміром ключа шифрування. Представлено таблицю порівняльного аналізу різних версій Bluetooth за технологічними параметрами. Наголошено, що в умовах сьогодення, усі інноваційні пристрої Інтернету речей оснащені технологією Bluetooth, яка забезпечує ефективну роботу та точні результати.

Ключові слова: Bluetooth, бездротова технологія, передача даних, порівняння, аналіз переваги, недоліки.

Zherebets O. Comparative analysis of different versions of bluetooth: advantages, disadvantages. The article compares different versions of Bluetooth. The analysis of the process of technology creation and the genesis are described. The concept and conditions of realization of Bluetooth wireless data transfer technology are formed. The process of establishing a connection is described in detail and a mechanism for separating network nodes, which are the main ones, ie the ones that transmit and the secondary ones, ie the ones that receive information, is proposed. A special computer data network using Bluetooth technology is schematically presented, and a diffuse network using the latest technologies is proposed. The protocol stack of technology with the separation of four levels, which are the basis, is described. The scope of Bluetooth is defined with a description of the principles of implementation. An analysis of each individual version of Bluetooth since 1999, it is noted that the first version was a replacement for the serial port of the computer RS-232 and the main functionality of Bluetooth 1.0 was a maximum data rate of about 732.2 Kbps, and the connection distance was 10 m. The second version contributed to a wider expansion of technology with improved data rates up to 3 Mbps. and increasing the range to 30 m. Version 3 has the ability to connect to Wi-Fi, which increased the speed of data transfer, including audio data. Bluetooth 4.0 has acquired Bluetooth Low Energy (BLE) or Bluetooth Smart, which has expanded its functionality, increased the range to 100 meters, and improved device pairing and reconnection, increased packet capacity, and data range for IoT devices. Bluetooth 5.2 allows you to transfer two different audio sources to two different audio devices at the same time, so two or more people can listen to two different genres of music, but stream from the same device. Improving Bluetooth 5.3 features is improving channel classification; availability of connection subtraction and improvement in encryption key size management. The table of comparative analysis of different versions of Bluetooth by technological parameters is presented. It is emphasized that in today's conditions, all innovative IoT devices are equipped with Bluetooth technology, which ensures efficient operation and accurate results.

Key words: Bluetooth, wireless technology, data transfer, comparison, analysis of advantages, disadvantages.

Вступ та постановка завдання. Bluetooth являє собою бездротову технологію, яка в основному використовується для обміну або передачі даних між двома пристроями, які з'єднані та здійснюють обмін повідомленнями. Основна передача даних реалізується за допомогою фіксованих і короткохвильових УВЧ радіохвиль в області промислових, наукових і медичних радіодіапазонів, зокрема в діапазоні від 2,400 до 2,485 ГГц. Бренд Ericsson, який започаткував найновішу технологію того дня, дав їй ім'я «Bluetooth» на честь короля Данії Харальда Bluetooth.

Bluetooth керується Спеціальною групою за інтересами Bluetooth, яка налічує понад 15 000 асоціацій-членів у регіонах телекомунікацій, обчислювальної техніки та мереж. Bluetooth раніше був стандартизований як IEEE 802.15.1, але, як окрема одиниця стандарт більше не існує. Щоб іменуватися пристроєм Bluetooth, необхідно відповідати стандартам, визначеним платою SIG.

Bluetooth – це з'єднувальний механізм, який забезпечує високошвидкісну, малопотужну бездротову мікрохвильову технологію, призначену для підключення телефонів, ноутбуків, колонок на інші портативні пристрої разом. Bluetooth полегшує життя користувача завдяки простоту та ефективному підключенню між кількома пристроями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх років оприлюднено ряд праць, у яких досліджуються основні аспекти розвитку та впровадження технологій Bluetooth.

Ю.О. Віннікова та Т.Р. Шмельова [1] представили аналіз перспектив розвитку та використання технології безпроводного зв'язку Bluetooth. Авторами запропоновано переваги, що надаються цією технологією, і недоліки. Також представлено перелік області практичного застосування і доцільність використання технології.

Стосовно порівняння сучасних бездротових технологій обміну інформацією варто відмітити роботу О. А. Суровцева та О. М. Павловського [2], які провели порівняльний аналіз сучасних бездротових технологій, таких як Wi-Fi, ZigBee та Bluetooth, а також представили основні характеристики мереж, побудованих за цими технологіями. Науковцями наведені результати експерименту порівняння енергоефективності технологій Bluetooth 4.2/5.0 та ZigBee та на базі проведено аналізу сформовані рекомендації для вибору технології побудови мережі, в залежності від умов експлуатації та призначення.

Ю. Є. Грудзинський та Я. Ю. Лукомський [3] розглянули особливості технології сенсорних mesh-мереж на базі технології Bluetooth Low Energy (BLE) для моніторингу об'єктів управління та описали технологію BLE. Авторами проаналізовано можливість використання Bluetooth як бази для mesh-мережі.

Аналіз комунікації пристроїв побудованих на базі технології Bluetooth Low Energy запропонував В. Р. Камаєв [4]. Також автором здійснено дослідження принципів управління електроенергією у системах розумного будинку на базі технології Bluetooth Low Energy [5].

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Kaisar Marilia [6], P. Raja & Singh Dushyant & Jerath Himani [7], Qian Yi & Ye Feng & Chen Hsiao-Hwa [8], Sauter Martin [9], James Alice & Seth Avishkar & Mukhopadhyay Subhas [10], Salah Khaled [11], Lounis Karim [12], Ward Hubert [13], S. Ashwini & R. Krithick [14] Nilsson Daniel & Yan Wenqing [15], Cäsar Matthias & Pawelke Tobias & Steffan Jan & Terhorst Gabriel [16] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набуток, за темою, питання порівняльного аналізу різних версій Bluetooth залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Здійснити порівняльний аналіз різних версій Bluetooth з відокремленням як переваг так і недоліків технології.

Викладення основного матеріалу дослідження. Логотип технології засновано на ініціалах короля Данії Харальда в честь якого вона і названа. Так, логотип увібрав у себе дві літери Фуртрак та Б'яркан та поєднав їх.

Bluetooth працює за механізмом головної підпорядкованої структури. Головний вузол мережі має можливість передавати інформацію підпорядкованим вузлам по черзі або одразу кільком точкам, що приймають інформацію та підключені до головної мережі побудованої на технології Bluetooth. Принцип передачі відповідає механізму управління на основі пакетів. Передача пакетів здійснюється на інтервалі певного обумовленого інтервалу часу, який відстежується у головному вузлі, який виступає транслятором. Пакети передаються на інтервалі часу усереднення, який становить близько 312,5 мкс. У випадку пакетів з одним слотом основний передавальний вузол мережі передає через парні інтервали або часові інтервали інформацію, а вузол, який приймає, отримує дану інформацію через непарні інтервали або слоти. У той же час, у випадку коли останній є вторинним передавачем, він (вузол, який приймає), приймає через парні інтервали, а передає через непарні інтервали пакети інформації. Пакети, як правило, мають 1,3 або до 5 слотів, але в усіх випадках з'єднання ініціюється головним вузлом мережі, і передача почнеться лише через рівні інтервали. Фундаментальною основою роботи технології Bluetooth виступає передача пакетів між провідним і підпорядкованим вузлами у загальній мережі передачі, яку також можна розглядати як невелику мережу, серед якої всі пристрої взаємопов'язані між собою.

Пристрій Bluetooth, що підключається, або головний пристрій у мережі можуть обмінюватися даними або з'єднуватися з максимум сімома пристроями в спеціальній комп'ютерній мережі з технологією Bluetooth (рисунок 1), хоча не кожен пристрій досягає цієї межі. Вузли мережі

мають можливість змінювати свої позиції у випадку трансляції інформації, і підпорядкований вузол може стати провідною мережею.

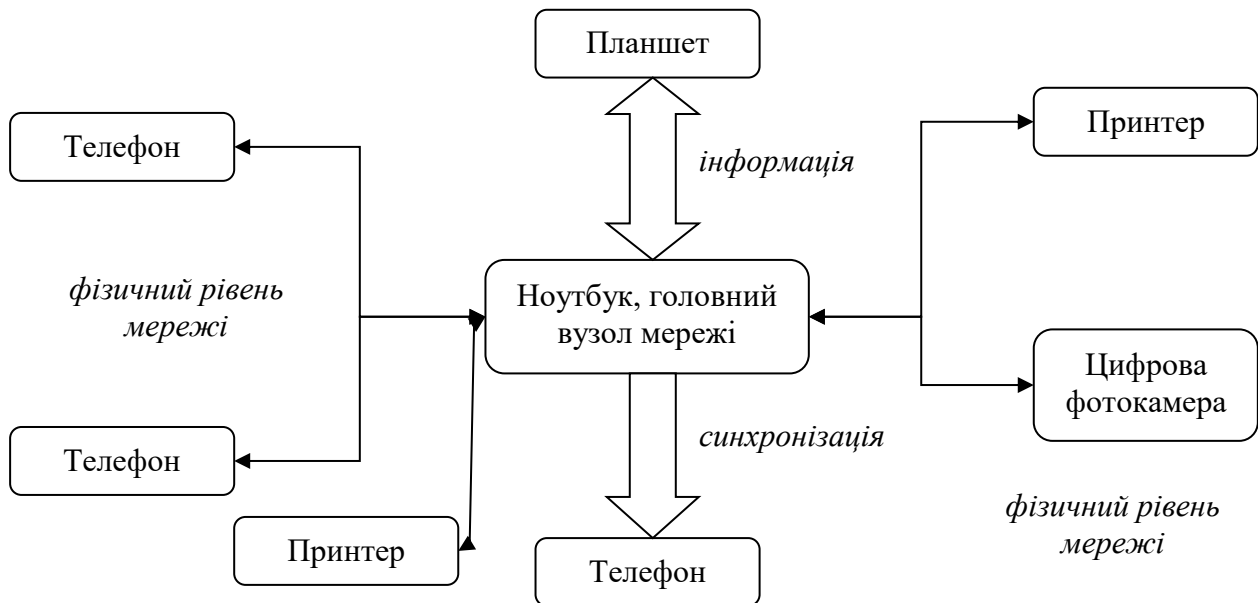


Рис. 1 – Схема спеціальної комп'ютерної мережі передачі даних за технологією Bluetooth

Новітні технології Bluetooth також передбачають з'єднання двох або більше спеціальних комп'ютерних мереж побудованих за технологією Bluetooth для формування більшої загальної мережі, в якій деякі пристрої одночасно відповідно до потреби відіграють роль вторинного вузла, тобто підпорядкованого в одній спеціальній мережі, а можуть відігравати роль основного вузла передачі в іншій. У будь-який момент часу пакети або дані можуть передаватися між головним пристроєм та іншим пристроєм. Головний пристрій має перевагу у праві вибору передачі даних між підпорядкованими вузлами. Як правило, він швидко перемикається з одного пристрою на інший за допомогою методики, відомої як кругова система, в якій визначається графік процесів. Так як, головний вузол обирає, до якого підпорядкованого пристрою звертатися, вузол, що є підпорядкованим (теоретично) повинен отримувати дані в кожному слоті прийому.

Bluetooth, як технологія бездротової передачі даних є відкритим стандартом WPAN (Wireless Personal Area Network), який полегшує спеціальний спосіб підключення пристроїв на невеликій відстані. Пристрої, що містять Bluetooth, можуть визначати місцезнаходження один одного, але дія користувача є важливою для встановлення з'єднання з іншими пристроями та з різних мереж.

Piconet – це спеціальна мережа, яка з'єднує групу безпроводних пристроїв з використанням технології Bluetooth. Piconet складається з двох або більше пристроїв (максимум вісім), що займають один і той самий фізичний канал (синхронізованих із загальним тактовим сигналом). Він дозволяє одному провідному пристрою з'єднуватися з сім'єю активними пристроїв, які виступають приймачами інформації. Один з цих восьми пристроїв діє як провідний, а інші – як підпорядковані. Таким чином, у Piconet можна підключити або підтримувати максимум 7 вторинних вузлів. Щоправда, коли два або кілька пристроїв виявляють один одного, з'єднуються та спілкуються через Bluetooth, утворюється невелика мережа, відома як мережа Piconet. Розсіяна мережа розвивається або формується, коли дві або кілька пікомереж з'єднуються разом. Ці численні пікомережі в основному з'єднані через мости, які діють як вузли. На додаток до семи підпорядкованих пристроїв, які діють на пікомережі, в одній мережі може бути до 255 неактивних вузлів, які можуть реагувати лише на сигнал головного вузла, коли він надсилається до активного вторинного вузла.

На рисунку 2 запропоновано дві окремі пікомережі, які разом утворюють більшу мережу, відому як розсіяна мережа. Пристрої, які присутні в суміжних пікомережах, забезпечують вузли, подібні до мосту, для підтримки з'єднань внутрішньої пікомережі, що дозволяє збіркам кількох пов'язаних пікомереж формувати фізично розширювану та ефективну комунікаційну інфраструктуру, відому як Scatternet. Piconet зазвичай охоплює невелику ділянку мережі, тоді як scatternet охоплює або забезпечує більший діапазон мережевого підключення. Piconet забезпечує

менш ефективне використання доступної пропускної здатності каналу Bluetooth, тоді як scatternet забезпечує ефективне використання пропускної здатності каналу Bluetooth.

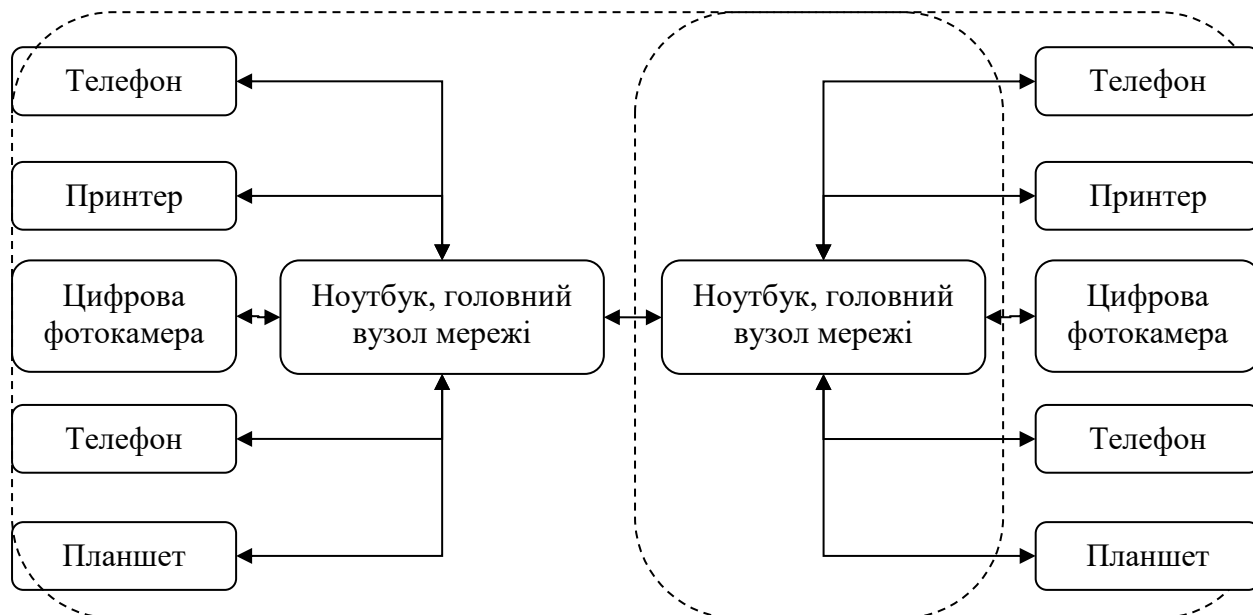


Рис. 2 – Розсіяна мережа Bluetooth

Протокольний стек технології Bluetooth ґрунтується на чотирьох шарах або рівнях. До їх складу варто віднести:

- програмний рівень;
- рівень проміжного програмного забезпечення;
- канальний рівень даних;
- фізичний рівень.

Стек протоколів Bluetooth є основною архітектурою, яка складається з ядра протоколів. Головними протоколами та такими що є обов'язковими відносять в основному LMP, L2CAP і SDP. Крім того, пристрої, які спілкуються за допомогою Bluetooth, майже повсюдно можуть використовувати протоколи, такі як HCI і RFCOMM. Рівень додатків дозволяє користувачеві або будь-якій особі взаємодіяти з додатком, встановленим для використання технології Bluetooth.

Сфери застосування технології Bluetooth масштабні, так Bluetooth:

- використовується для передачі різних файлів, зображень і MP3 або MP4 між мобільними телефонами, планшетами, ноутбуками;
- використовується для додатків із низькою пропускною здатністю, де більша пропускна здатність USB часто не потрібна, а підключення без кабелю є пріоритетним;
- використовується в обладнанні для реєстрації даних та передачі даних на комп'ютер через технологію Bluetooth;
- використовується для реалізації бездротового керування та зв'язку між мобільним телефоном і Bluetooth-сумісною стереосистемою автомобіля;
- використовується для елементів керування, де часто присутні інфрачервоні датчики або технології;
- використовується у рамках системи визначення місцезнаходження в режимі реального часу. Даний принцип використання засновано в основному на відстеженні та ідентифікації місцезнаходження різних об'єктів, що працюють у реальному часі, за допомогою «тегів», прикріплених до відстежуваних об'єктів або вставлених на їх базі, і «зчитувачів», які отримують і одночасно обробляють бездротові сигнальні мережі з цих тегів, щоб визначити їх точне розташування;
- використовується у випадку бездротового зв'язку, типовим прикладом якого є WAN (Wireless Area Network);
- використовується у випадку бездротової миші, клавіатури, навушників та всіх найновіших бездротових гаджетів на ринку IT технологій.

Першою версією Bluetooth була, версія 1.0-1.2. Дана розробка була заміною серійного порту комп'ютера RS-232. З появою версії Bluetooth 1.2 технологія була встановлена на різні пристрої такі як бездротові навушники, мобільні телефони, ноутбуки, автомобілі та цифрові фотоапарати. Основна функціональність версії Bluetooth 1.0 полягала у максимальній швидкості передачі даних близько 732,2 Кб/с, а дистанція підключення становила 10 м. Версія 1.2 підвищила швидкість передачі даних до 1 Мбіт/с. Однак незважаючи на вдосконалення версії Bluetooth 1.0 вона була недостатня для передачі високоякісного аудіо через власну пропускну здатність. Причина в тому, що в той час стандарт призначався головним чином для телефонних розмов, а не для прослуховування музики.

У 2005 році вийшла оновлена версія Bluetooth 2.0, що посприяла більш ширшому розширенню технології. Найбільш значним удосконаленням цієї версії стала покращена швидкість передачі даних. Вона зросла до 3 Мбіт/с. Також відбулося підвищення діапазону дії до 30 м, технологія характеризувалась низьким енергоспоживанням та підвищеною автономністю бездротових пристроїв. Проте недоліки залишились, якість звуку була посередньою, також більшість пристроїв використовували кодек SBC, а він, у свою чергу, відомий низькою якістю стиснення цифрових файлів, що призводило до низької якості та затримки звуку.

Bluetooth 3.0 + HS (High Speed) вийшов у 2009 році. Ця версія отримала можливість підключення до Wi-Fi, що дозволило підвищити швидкість передачі даних, зокрема аудіоданих. Серед інших удосконалень варто наголосити на появі режимів L2CAP Enhanced та альтернативи MAC та PHY для передачі цифрових файлів великого розміру. Проте недоліком стало високе енергоспоживання та тривалість роботи пристроїв із підтримкою цього стандарту бездротового зв'язку стала нижчою.

2010 рік приніс нову версію Bluetooth 4.0-4.2, яка отримала покращення у вигляді Bluetooth Low Energy (BLE) або Bluetooth Smart. Останній дозволяв невеликим пристроям на зразок фітнес-трекерів, слухових апаратів та навушників довше залишатися підключеними при невеликій витраті енергії. Підтримка кодека aptX підвищила швидкість передачі аудіо даних, діапазон дії розширився до 100 м., також відбулося покращення зв'язування та повторного зв'язування пристроїв, збільшення ємності пакетів та діапазону даних для пристроїв Інтернету речей.

Bluetooth 5.2 представлена на ринку у 2016 році. Це найефективніша версія стандартів бездротового зв'язку Bluetooth. Проте вона ефективна при використанні з сумісними пристроями або периферійними пристроями. Однак Bluetooth має зворотну сумісність, тому користувач може продовжувати використовувати існуючий Bluetooth 4.2 і старіший пристрій із телефоном стандарту Bluetooth 5.2. Bluetooth 5.2 забезпечує нову і сучасну функцію, яка дозволяє користувачеві відтворювати аудіо на кількох підключених пристроях одночасно. Нова технологія Bluetooth дозволяє одночасно передавати два різних джерела звуку на два різні аудіопристрої, тож двоє або кілька людей можуть слухати два різних жанри музики, але потоково з одного пристрою.

До головних переваг нової Bluetooth 5.2 варто віднести:

- діапазон, швидкість і висока пропускну здатність;
- дальність бездротового зв'язку Bluetooth 5.2 перевищує 120 метрів у порівнянні з попередніми версіями. Це розширення діапазону та, крім того, можливість передавати аудіо на два пристрої, означає, що люди можуть передавати аудіо в кілька областей кімнати, що створює стереоефект в одному обмеженому просторі, або обмінюватися звуками між двома різними наборами навушників. Розширений діапазон також сприяє кращому зв'язку між пристроями.

Bluetooth версії 5.3 був представлений 13 липня 2021 року. Покращення функцій Bluetooth 5.3 полягають у наступному:

- покращення класифікації каналів;
- наявність функції віднімання з'єднання;
- покращення в управлінні розміром ключа шифрування.

Проте на базі даної версії біло видалено функцію альтернативного розширення MAC та PHY (AMP).

Порівняльний аналіз різних версій Bluetooth за технологічними параметрами наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз різних версій Bluetooth

Технологія	Рік виходу	Стандарт	Частота	Пропускна здатність	Радіус дії
Bluetooth v.1.0	1999	IEEE 802.15.1	2.4 ГГц	До 1 Мбіт/с	До 10 метрів
Bluetooth v.2.0	2005	IEEE 802.15.3	2.4 ГГц	До 2.1 Мбіт/с	До 30 метрів
Bluetooth v.3.0	2009	IEEE 802.11	2.4 ГГц	Від 3 до 24 Мбіт/с	До 60 метрів
Bluetooth v.4.0	2010	IEEE 802.11	2.4 ГГц	Від 3 до 24 Мбіт/с	До 100 метрів
Bluetooth v.5.0	2016	IEEE 802.11n	2.4 ГГц	Від 3 до 48 Мбіт/с	До 240 метрів
Bluetooth v.5.3	2021	IEEE 802.11n	2.4 ГГц	Від 3 до 48 Мбіт/с	До 240 метрів

Bluetooth 5.3 перевершує стару версію Bluetooth 4.2 майже в усіх аспектах. Завдяки збільшеному радіусу дії, потужності, надійності та продуктивності. Усі інноваційні пристрої Інтернету речей оснащені технологією Bluetooth, яка забезпечує ефективну роботу та точні результати.

Висновки. У роботі здійснено порівняльний аналіз різних версій Bluetooth з відокремленням як переваг так і недоліків технології. На сьогоднішній день, технологія Bluetooth визнана потужною бездротовою технологією, яка використовує повітряний інтерфейс, для формування спеціальної мережі передачі даних. Технологію Bluetooth, з її інноваційними функціями, є можливість ефективно використовувати як портативний або стаціонарний пристрій, а оновлені та високоякісні методи безпеки формують надійність каналів для передачі приватних та конфіденційних даних.

Перспективами подальшої роботи є дослідження принципів з'єднання окресленої технології з відомими аналогами та розробка механізмів підвищення пропускної здатності.

Список бібліографічного опису

1. Віннікова Ю.О. Аналіз перспектив використання технології Bluetooth / Ю.О. Віннікова, Т.Р. Шмельова // Інфокомунікації – сучасність та майбутнє: матеріали 7-ої Міжнар. наук-практ. конф., 26-27 жовтня 2017 р., Одеса. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2017. – Ч. 1. – С. 132-134.
2. Суровцев, О. А. Порівняння сучасних бездротових технологій обміну інформацією / О. А. Суровцев, О. М. Павловський // XI Науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування», 15-16 травня 2018 р., м. Київ, Україна : збірник статей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ. – Київ : Центр учбової літератури, 2018. – С. 64-66.
3. Грудзинський, Ю. Є. Побудова сенсорної mesh-мережі промислового інтернету речей на основі технології Bluetooth 4.2 / Ю. Є. Грудзинський, Я. Ю. Лукомський // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 16 (1292). – С. 107-111.
4. Камаєв В.Р. Аналіз комунікації пристроїв побудованих на базі технології Bluetooth Low Energy / Камаєв В.Р. // Матеріали VII науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» (11-12 грудня 2019 року) – Тернопіль, ТНТУ – 2019 – с. 52.
5. Камаєв В.Р. Управління електроенергією у системах розумного будинку на базі технології Bluetooth Low Energy / Камаєв В.Р. // Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (27-28 листопада 2019 року) – Тернопіль, ТНТУ – 2019 – с. 96.
6. Kaisar, Marilia. (2022). Bluetooth Orgasms. *MedieKultur: Journal of media and communication research*. 37. 143-160. 10.7146/mediekultur.v37i71.125253.
7. P., Raja & Singh, Dushyant & Jerath, Himani. (2021). Bluetooth Robotics. 10.1201/9781003161097-8.
8. Qian, Yi & Ye, Feng & Chen, Hsiao-Hwa. (2021). Bluetooth Security. 10.1002/9781119244400.ch8.
9. Sauter, Martin. (2021). Bluetooth and Bluetooth Low Energy. 10.1002/9781119714712.ch8.
10. James, Alice & Seth, Avishkar & Mukhopadhyay, Subhas. (2022). Bluetooth Based IoT System. 10.1007/978-3-030-85863-6_7.
11. Salah, Khaled. (2022). Verification of the Integrated Bluetooth Modem. 10.1007/978-3-030-88626-4_5.
12. Lounis, Karim. (2021). Cut It: Deauthentication Attack on Bluetooth. 1-8. 10.1109/SIN54109.2021.9699265.
13. Ward, Hubert. (2022). Using Bluetooth with PIR Motion Sensors. 10.1007/978-1-4842-7230-5_8.
14. S., Ashwini & R., Krithick. (2021). Bluetooth based Home Automation. *IARJSET*. 8. 10.17148/IARJSET.2021.8974.
15. Nilsson, Daniel & Yan, Wenqing. (2021). Identifying Bluetooth Low Energy Devices. 375-376. 10.1145/3485730.3492880.

16. Cäsar, Matthias & Pawelke, Tobias & Steffan, Jan & Terhorst, Gabriel. (2022). A survey on Bluetooth Low Energy security and privacy. *Computer Networks*. 205. 108712. 10.1016/j.comnet.2021.108712.

References

1. Yu.O. Vinnikova Analysis of prospects for the use of Bluetooth technology / Yu.O. Vinnikova, T.R. Shmelova // *Infocommunications - modernity and future: materials of the 7th International science and practice conference*, October 26-27, 2017, Odesa. – Odesa: ONAZ named after O.S. Popova, 2017. - Part 1. - P. 132-134.
2. Surovtsev, O. A. Comparison of modern wireless information exchange technologies / O. A. Surovtsev, O. M. Pavlovsky // *XI Scientific and practical conference of students and postgraduates "Looking into the future of instrument engineering"*, May 15-16, 2018. , Kyiv, Ukraine: collection of articles / KPI named after Igor Sikorskyi, PBF. – Kyiv: Center for Educational Literature, 2018. – P. 64–66.
3. Grudzinskiy, Yu. Ye. Construction of a sensor mesh network of the industrial Internet of things based on Bluetooth 4.2 technology / Yu. Ye. Grudzinskiy, Ya. Yu. Lukomskiy // *Bulletin of NTU "KhPI"*, Series: New solutions in modern technologies. - Kharkiv: NTU "KhPI". – 2018. – No. 16 (1292). - P. 107-111.
4. Kamaev V.R. Communication analysis of devices built on the basis of Bluetooth Low Energy technology / Kamaev V.R. // *Materials of the VII scientific and technical conference "Information models, systems and technologies"* (December 11-12, 2019) - Ternopil, TNTU - 2019 - p. 52.
5. Kamaev V.R. Electricity management in smart home systems based on Bluetooth Low Energy technology / V.R. Kamaev. // *Materials of the 8th international scientific and technical conference of young scientists and students "Actual tasks of modern technologies"* (November 27-28, 2019) - Ternopil, TNTU - 2019 - p. 96.
6. Kaisar, Marilia. (2022). Bluetooth Orgasms. *MedieKultur: Journal of media and communication research*. 37. 143-160. 10.7146/mediekultur.v37i71.125253.
7. P., Raja & Singh, Dushyant & Jerath, Himani. (2021). Bluetooth Robotics. 10.1201/9781003161097-8.
8. Qian, Yi & Ye, Feng & Chen, Hsiao-Hwa. (2021). Bluetooth Security. 10.1002/9781119244400.ch8.
9. Sauter, Martin. (2021). Bluetooth and Bluetooth Low Energy. 10.1002/9781119714712.ch8.
10. James, Alice & Seth, Avishkar & Mukhopadhyay, Subhas. (2022). Bluetooth Based IoT System. 10.1007/978-3-030-85863-6_7.
11. Salah, Khaled. (2022). Verification of the Integrated Bluetooth Modem. 10.1007/978-3-030-88626-4
12. Lounis, Karim. (2021). Cut It: Deauthentication Attack on Bluetooth. 1-8. 10.1109/SIN54109.2021.9699265
13. Ward, Hubert. (2022). Using Bluetooth with PIR Motion Sensors. 10.1007/978-1-4842-7230-5
14. S, Ashwini & R, Krithick. (2021). Bluetooth based Home Automation. *IARJSET*. 8. 10.17148/IARJSET.2021.8974.
15. Nilsson, Daniel & Yan, Wenqing. (2021). Identifying Bluetooth Low Energy Devices. 375-376. 10.1145/3485730.3492880.
16. Cäsar, Matthias & Pawelke, Tobias & Steffan, Jan & Terhorst, Gabriel. (2022). A survey on Bluetooth Low Energy security and privacy. *Computer Networks*. 205. 108712. 10.1016/j.comnet.2021.108712.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-21>

УДК 621.379, 004.032.6

Обухова Катерина Олександрівна, ст. викладач,

<https://orcid.org/0000-0001-8793-7055>

Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна.

БЕЗПЕЧНЕ ВІДДАЛЕНЕ ПІДКЛЮЧЕННЯ ДО ІР-КАМЕР ЧЕРЕЗ МЕРЕЖУ ІНТЕРНЕТ

Обухова К.О. Безпечне віддалене підключення до ІР-камер через мережу Інтернет. ІР-камери стали частиною нашого повсякденного життя. Власники камер відеоспостереження хочуть мати доступ до відеоканал в реальному часі на смартфонах, віддалених комп'ютерах та інших мобільних пристроях. Для цього потрібно налаштувати безпечне підключення до ІР-камер через мережу Інтернет. У цій статті досліджуються різні методи підключення для захисту системи відеоспостереження в Інтернеті.

Ключові слова: ІР-камери, система відеоспостереження, метод «точка-точка», переадресація портів, VPN-тунелювання

Obukhova K. Secure remote connection to IP cameras via the Internet. IP cameras have become part of our everyday life. CCTV camera owners want to have access to a real-time video feed on smartphones, remote computers and other mobile devices. To do this, you need to configure a secure connection to the IR cameras via the Internet. This article explores different connection methods for securing an Internet CCTV system.

Keywords: IP cameras, video surveillance, point-to-point, port forwarding, VPN

Постановка наукової проблеми. ІР-камери стають все більш популярними. З міркувань безпеки вони активно використовуються для моніторингу будинків, робочих місць, громадських місць і доріг. Через розташування установки більшість методів доступу є віддаленим.

Компанії та домовласники все більше покладаються на камери Інтернет-протоколу (ІР) для спостереження віддалено на смартфонах або інших мобільних пристроях. Занадто часто це дає їм хибне відчуття безпеки: хоча насправді зловмисники можуть не лише отримати доступ і переглянути канал камери, але й використати незахищений пристрій, щоб зламати саму мережу.

Аналіз досліджень. Нові дослідження показують експоненціальне збільшення кількості використання саме ІР-камер. Так, на основі даних 28 найпопулярніших виробників, було виявлено, що 3,5 мільйона ІР-камер підключено до Інтернету, що свідчить про восьмикратне збільшення за останні 2 роки [3].

Ця тенденція викликає занепокоєння, оскільки пристрої, підключені до Інтернету, можуть бути вразливими до атак – зловмисники можуть отримати доступ до прямої трансляції з камери, збирати конфіденційні дані та запускати подальші атаки в мережі.

Так, наприклад, у березні 2021 року команда хакерів зламала велику кількість ІР-камер, що належать виробника Verkada. Хакери отримали доступ до трансляцій камер відеоспостереження у хмарі, які розкривають дані та інтелектуальну власність на таких підприємствах, як Tesla, школах і в'язницях [2].

Серед проаналізованих брендів всі мають принаймні деякі моделі, які дозволяють користувачам зберігати паролі за замовчуванням або не мають жодних налаштувань автентифікації.

Також за допомогою запитів до відомих виробників було виявлено понад 1 мільйон камер спостереження та понад 125 000 серверів спостереження, відкритих для Інтернету. З цих пристроїв 90 % не мають захищених порталів входу (використовують HTTP, а не HTTPS). Крім того, приблизно 8 % мають відкриті порти SSH і Telnet, 3 % мають розкриті бази даних MySQL, і принаймні 1,7 % цих пристроїв все ще вразливі до вразливості HeartBleed SSL, виявленої ще у 2012 році.

Навіть великі виробники відеоспостереження мають моделі камер відеоспостереження з незахищеним підключенням. Наприклад, на сервері CCTV від Samsung принаймні 83 тисячі пристроїв, де 86 % використовують портали входу HTTP, а 1604 мають відкриті порти SSH. Більше того, HikVision, виробник систем відеоспостереження з найбільшою на сьогодні часткою ринку в 24,7 %, має принаймні 260 тисяч пристроїв, які піддаються впливу, і лише 53 з них мають увімкнений HTTPS [1].

В одному з досліджень було виявлено, що приблизно 73 000 камер безпеки в 256 країнах доступні за допомогою стандартних паролів. Ці статистичні дані підкреслюють низький рівень безпеки ІР-систем відеоспостереження [4].

Метою дослідження є аналіз переваг і недоліків різних способів віддаленого підключення до системи відеоспостереження та визначення найбільш безпечного віддаленого підключення IP-камер.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Перш ніж розглянути способи віддаленого підключення до IP-камер, потрібно зазначити, що на безпеку також впливають уразливості самої системи відеоспостереження, такі як бекдори або використання стандартних паролів, які дозволяють хакерам отримати несанкціонований доступ.

Бекдор-зломи, які траплялися в минулому, відбувалися через лазівки та лінійні програмні недогляди, які призводили до експлоїтів. Неякісні системи відеоспостереження зазвичай мають бекдори, які не були розглянуті через недостатні інвестиції часу та грошей у захист пристроїв. Багато скомпрометованих брендів також не надають оновлень для вирішення проблем безпеки, часто тому, що ці діри в безпеці неможливо закрити.

З незахищеною системою камер потрібно турбуватися не лише про вразливість цієї системи до злому, але й про інші пристрої в мережі, які також можуть стати вразливими. Відповідно до цієї історії в Реєстрі, системи відеоспостереження з бекдорами можуть використовуватися для атаки на інші пристрої у домашній або робочій комп'ютерній мережі та викрадення конфіденційної інформації [5].

Використання слабких паролів або паролів за замовчуванням є помилкою номер один, яка дозволяє хакеру проникнути в систему відеоспостереження в Інтернеті або будь-який пристрій IoT. Хакери використовують ботів для перевірки комбінацій відомих паролів, які використовуються виробниками пристроїв, щоб легко вгадати паролі та отримати доступ до камер або відеореєстраторів безпеки по всьому світу, підключених до Інтернету.

Є кілька різних способів віддаленого підключення до системи відеоспостереження. Кожен із методів має свої переваги та недоліки, і жодна система не застрахована від злому, якщо вона підключена до Інтернету. Нижче розглянемо різні методи доступу до системи відеоспостереження, починаючи від найпростішого та найменш безпечного віддаленого підключення до найбезпечнішого.

Метод «точка-точка»

Підключення «точка-точка» (point-to-point, P2P) або хмарне з'єднання – це спосіб з'єднання, який дозволяє використовувати мобільний пристрій за допомогою застосунку для підключення системи відеоспостереження через сервер, що знаходиться в хмарі або в чужому центрі обробки даних, безпосередньо до пристрою.

Використання цього методу для віддаленого підключення є найпростішим у налаштуванні та стає все більш популярним. Метод P2P не потребує складних мереж, таких як переадресація портів або VPN. У першу чергу пристрої, орієнтовані на домашніх споживачів, використовують P2P як спосіб віддаленого перегляду, оскільки користувачі, які не мають технічних знань, легко налаштувати за допомогою смартфона.

Принцип роботи полягає в тому, що смартфон (чи інший мобільний пристрій) та камера підключається до «хмари» або P2P-сервера виробника або сервера третьої сторони (рис. 1). Зазвичай, існує певна форма безпечної автентифікації, після чого надається доступ до відеоканалу та системи.

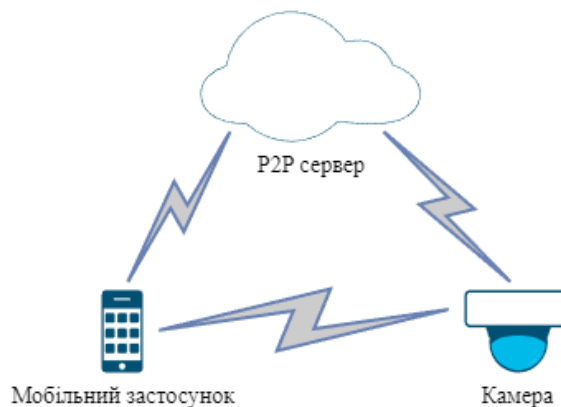


Рис. 1 – Схема підключення «точка-точка»

Оскільки дані у цьому випадку проходять через інший сервер, існує збільшена при передачі відеоданих. Для користувачів із повільним підключенням до Інтернету це може стати перешкодою для віддаленого перегляду у режимі «наживо». Для тих, хто має швидке підключення до Інтернету, © Обухова К.О.

затримка може бути не такою помітною, але вона все одно є. Будь-який віддалений перегляд матиме певну затримку, але при підключенні «точка-точка» вона найбільш виражена.

Переваги хмарного з'єднання:

- проста конфігурація;
- пристрої прив'язані до одного облікового запису і ними можна легко поділитися з ким забажаєте.

Недоліки методу:

- використовує UPnP – технологію універсального автоматичного налаштування мережевих пристроїв, тому немає можливості контролювати, які порти відкриваються;
- дані проходять через сервер третьої сторони і доступ до них є у власника цієї хмари;
- при віддаленому підключенні є певна затримка, які може бути доволі критичною при нестабільному підключенні до Інтернету.

Загалом P2P є безпечним методом віддаленого перегляду, якщо нікому не передавати інформацію про віддалений перегляд, а саме серійний номер запису камери безпеки чи камери.

Однак, не всі виробники створюють якісні рішення «точка-точка» або не завжди оновлюють такі рішення, для відповідності новому програмному забезпеченню (рис. 2).



Виявлено невідпідтримуваний браузер або операційну систему!

Ви використовуєте невідпідтримуваний браузер або операційну систему, тому веб-портал mydlink може виглядати, поводитися або функціонувати не так, як передбачалося.

Які операційні системи та браузери підтримує mydlink?

Ми рекомендуємо використовувати Firefox 12-51/52 ESR у Windows або MacOS для доступу до порталу mydlink. Крім того, ви можете використовувати наші мобільні програми для доступу до своїх пристроїв.

[Перегляньте мобільні програми mydlink.](#)

Рис. 2 – Сервіс виробника камери підтримує тільки застарілі версії браузера

Деякі з них не вимагають, щоб камера була прив'язана до одного облікового запису, тому можна легко отримати доступ до неї, якщо відомий серійний номер пристрою та параметри за замовчуванням не були змінені. Крім того, якщо ця компанія припинить свою діяльність і припинить підтримувати свій сервер, у вас не залишиться жодних засобів для підключення до вашої системи відеоспостереження, крім двох інших методів (переадресація портів або VPN).

Отже, метод дистанційного «точка-точка» призначений переважно для домашніх користувачів.

Метод переадресації портів

Переадресація портів (port forwarding) – це функція маршрутизаторів, яка дозволяє користувачеві налаштувати певні комунікаційні порти для маршрутизації до пристроїв у мережі, наприклад комп'ютера, відеореєстратора або IP-камери (рис. 3).

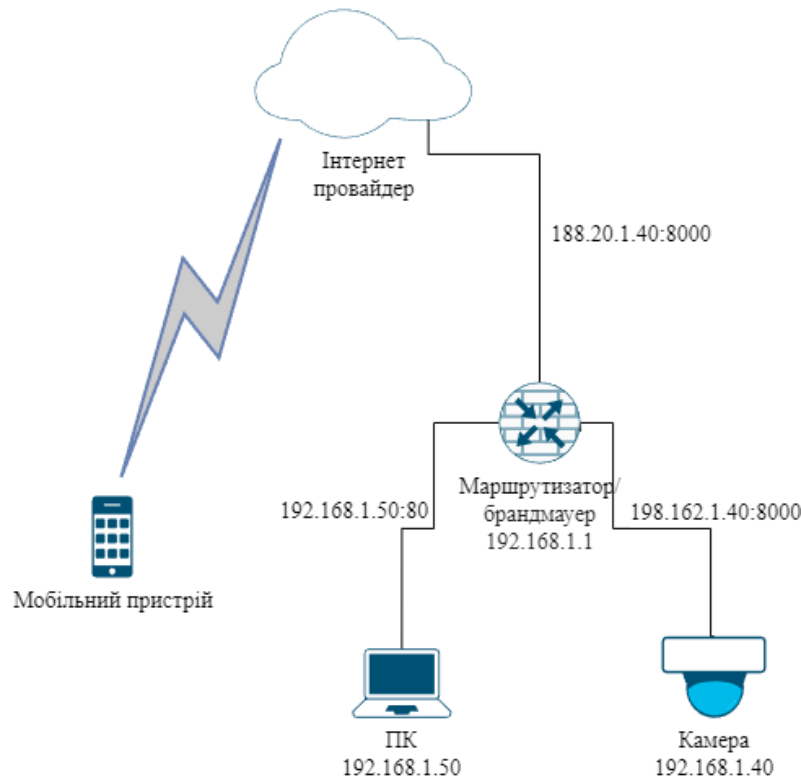


Рис. 3 – Структура схема налаштування переадресації портів

Найбільшою перешкодою для переадресації портів є вимога статичної IP-адреси. IP-адресу призначає маршрутизатору ваш Інтернет-провайдер (ISP). Більшість домашніх підключень до Інтернету періодично отримують нову IP-адресу, коли постачальник послуг виконує технічне обслуговування або вимикається електроенергія. Якщо IP-адреса зміниться, доступ до системи відеоспостереження буде заблоковано, доки не отримаєте адресу, на яку її було змінено.

Як обхідний шлях можна скористатися безкоштовною службою служби динамічних доменних імен (DDNS), вбудованою в більшість доступних на ринку маршрутизаторів, або спеціальними застосунками. Це дозволяє легко відстежувати зміну IP-адрес під час підключення до Інтернету. Маршрутизатор повертає на захищений сервер, поточну IP-адресу, тому можна використовувати зрозуміле ім'я, наприклад myhomesystem.ddns.net, щоб отримати доступ до IP-камери з Інтернету.

Перенаправлення портів безпечніше, ніж P2P, оскільки це пряме підключення до камери через маршрутизатор. Це пряме з'єднання усуває будь-яку додаткову затримку або час затримки, які зазвичай зустрічаються з хмарними з'єднанням. Поки нікому не надаєте IP-адресу/адресу DDNS, ім'я користувача або пароль, переадресація портів є кращим способом віддаленого перегляду порівняно з P2P.

Переваги переадресації портів:

- можливість контролювати, які порти відкриваються;
- доступ до повних налаштувань камери;
- через встановлення прямого з'єднання немає додаткової затримки при підключенні до камери у режимі «наживо»;
- для віддаленого доступу можна вибрати статичний IP-адресу або динамічну IP-адресу (за допомогою DDNS).

Мінуси:

- відкриті порти залишаються відкритими весь час;
- якщо немає інструментів для виявлення або запобігання вторгненню, система піддається атакам з Інтернету;
- якщо користувач має слабкий пароль, він компрометує систему.

Використання цього методу поки що є найбільш гнучким варіантом, якщо потрібен більш детальний контроль, особливо в ситуаціях, коли для доступу до системи потрібно більше ніж одній людині.

Крім того, використання служби DDNS полегшує доступ через веб-браузер без необхідності встановлення клієнта ПК/Мас, пов'язаного з системою. DDNS дозволяє використовувати «myscompany.com:80» замість фактичної IP-адреси, наприклад «188.40.100.xx:80», яка може змінюватися за бажанням і бажанням вашого провайдер.

Переадресацію портів рекомендовано для комерційного та домашнього використання для підзвітності та контрольованого доступу до системи відеоспостереження.

VPN-тунелювання

Віртуальна приватна мережа (VPN) – це технологія, за допомогою якої можна створити безпечне та зашифроване з'єднання через менш захищену мережу, наприклад публічний Інтернет. VPN працює, використовуючи спільну загальнодоступну інфраструктуру, зберігаючи конфіденційність за допомогою процедур безпеки та протоколів тунелювання. Тунелювання працює подібно до методу «точка-точка», за винятком того, що це безпечний зашифрований тунель до вашої мережі ззовні через Інтернет (рис. 4).

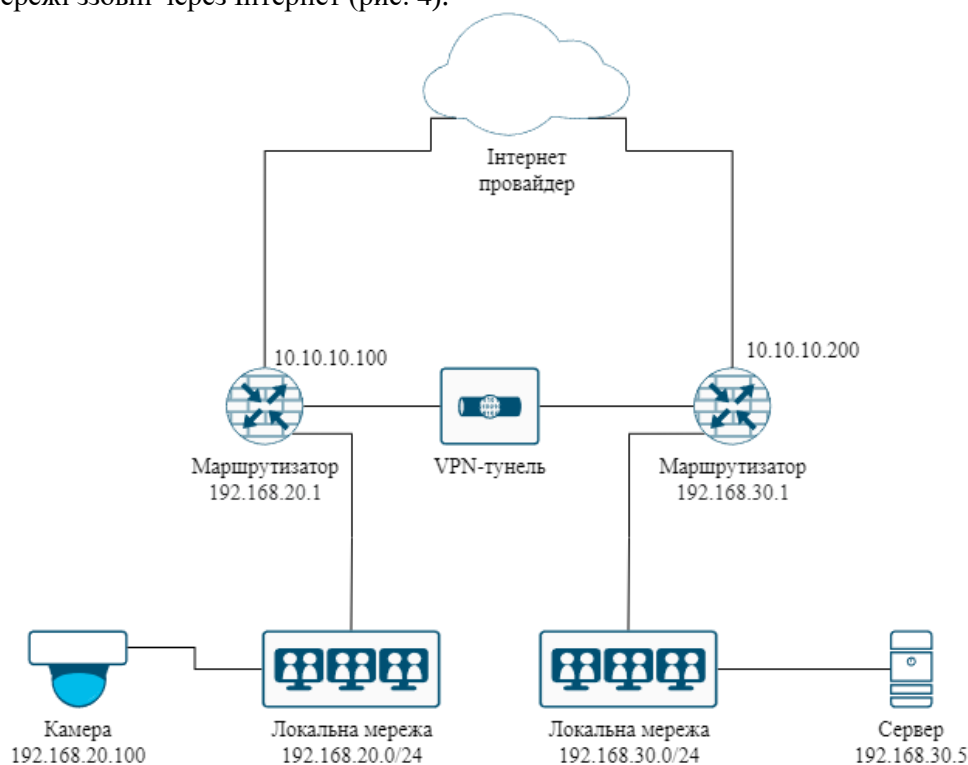


Рис. 4 – Структура схема встановлення VPN-тунелювання

Використання VPN або віртуальної приватної мережі є одним із найбезпечніших способів віддаленого доступу до системи відеоспостереження. VPN дозволяє безпосередньо підключатися до домашньої мережі з будь-якої точки світу. Прямі з'єднання, такі як VPN або переадресація портів, безпечніші, ніж використання P2P. Після встановлення VPN-з'єднання з домашньою мережею можна робити все, що завгодно, із системою відеоспостереження.

VPN відносно легко налаштувати на більшості домашніх маршрутизаторів, і його можна використовувати на ПК з будь-якою операційною системою, а також на мобільних пристроях під Android чи iOS.

Важливо зауважити, що не всі VPN однакові. Маршрутизатори матимуть різні можливості VPN, доступні для налаштування. Залежно від того, скільки камер потрібно підключити, знадобиться маршрутизатор із достатньо потужним процесором для розміщення VPN. Також знадобиться достатньо потужне підключення до Інтернету, щоб розмістити VPN із відеоданими. Слід враховувати також, що деякі маршрутизатори мають сильніше VPN-з'єднання, якщо вони з'єднані з пристроями однієї марки та моделі.

VPN уразливі, лише якщо вони загальнодоступні або, якщо комусь надано інформацію про VPN. Більшість програмного забезпечення VPN потребує щомісячну оплату, яка може бути значно високою.

Переваги тунелювання:

- даний метод пропонує більшу безпеку під час підключення з віддалених місць;
- можна використовувати для безпечного моніторингу третьою стороною;

- не потребує DDNS;
- немає необхідності відкривати порти системи та маршрутизатора для Інтернету та ризикувати відкритими атаками.

Недоліки використання VPN:

- швидкість з'єднання може бути нижчою через витрати VPN, які використовуються для шифрування трафіку;
- для підключення необхідно виконувати додаткові кроки, що зменшує простоту налаштування;
- кращі VPN мають доволі високу помісячну оплату.

Технологія VPN є дуже безпечним способом моніторингу системи відеоспостереження, але вона рідко використовується користувачами у домашніх мережах через складність налаштування VPN та високу вартість послуг.

Отже, VPN-тунелювання рекомендовано для використання в професійних, охоронних і корпоративних системах відеоспостереження.

Ці методи найчастіше використовуються, коли йдеться про підключення до систем відеоспостереження, але який метод потрібно обрати визначається потребами локальної мережі.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Хмарні з'єднання є загалом безпечним методом віддаленого доступу до IP-камери, але не всі виробники створюють високоякісні рішення. Деякі з них не вимагають прив'язувати камери до одного облікового запису або не використовують захищені протоколи при передачі даних. Також, завжди є ризик що до конференційних даних отримає доступ третя сторона, наприклад, власних хмарного серверу.

Використання методу переадресації портів є найбільш гнучким варіантом серед усіх розглянутих, особливо якщо потрібен більш тонкий контроль над налаштуваннями камери, наприклад, якщо доступ до системи має більше однієї людини. І хоча для переадресації портів потрібно мати статичну IP-адресу, є велика кількість сервісів, що надають послугу DDNS, яка дозволяє використовувати цей метод підключення навіть з динамічною IP-адресою.

Використання віртуальної приватної мережі є найбільш безпечним способом моніторингу систем відеоспостереження, але рідко використовується користувачами домашніх мереж через складність налаштування VPN і високу вартість послуги.

Отже, метод «точка-точка» в першу чергу орієнтованих на домашніх системи відеоспостереження. Переадресація портів рекомендується вже як для комерційного використання, так і приватного, а також, якщо потрібно надавати контрольований доступ до систем відеоспостереження. Використання VPN рекомендується для використання в професійних, охоронних і корпоративних системах відеоспостереження.

Список бібліографічного опису

1. Дел Кастільо М., Хермоса Х., Астілло П., Чудхарі Г., Драгоні Н. Програмно-визначена мережева безпечна система відеоспостереження з підтримкою Інтернету. Застосування інформаційної безпеки, 2023. С. 89-101. DOI:10.1007/978-3-031-25659-2_7.
2. Альшалаві Р., Хозіум О. Практичний приклад перевірки трафіку моніторингу IP-камери. Міжнародний журнал передових досліджень, 2020. Т. 8(12):1-11. DOI:10.23956/IJARSSE.V8I12.924.
3. Калбо Н., Мирський Ю., Шабтай А., Еловіч Ю. Безпека IP-систем відеоспостереження. Датчики, 2020. Т. 20(17):4806. DOI: 10.3390/s20174806.
4. Сю К.-Л., Ву Т.-Ю. Нове керування віддаленим доступом до потокових даних IP-камер у реальному часі. Міжнародний журнал систем управління базами даних (IJDMS), 2020. Т. 12, № 2. DOI: 10.5121/ijdms.2020.12201.
5. Ельхаррус О., Алмаадід Н., Аль-Маадід С. Огляд систем відеоспостереження. Журнал візуальної комунікації та представлення зображень, 2021. Том. 77. DOI: 10.1016/j.jvcir.2021.103116.

References

1. Del Castillo M., Hermosa H., Astillo P., Choudhary G., Dragoni N. Software-Defined Network Based Secure Internet-Enabled Video Surveillance System. Information Security Applications, 2023. pp. 89-101. DOI:10.1007/978-3-031-25659-2_7.
2. Alshalawi R., Khozium O. A Case Study of IP Camera Monitoring Traffic Verification. International Journal of Advanced Research, 2020. Vol. 8(12):1-11. DOI:10.23956/IJARSSE.V8I12.924.
3. Kalbo N., Mirsky Y., Shabtai A., Elovici Y. The Security of IP-Based Video Surveillance Systems. Sensors (Basel), 2020. Vol. 20(17):4806. DOI: 10.3390/s20174806.
4. Sue K.-L., Wu T.-Y. A novel remote access control for the real-time streaming data of IP cameras. International Journal of Database Management Systems (IJDMS), 2020. Vol.12, No.2. DOI : 10.5121/ijdms.2020.12201.
5. Elharrouss O., Almaadeed N., Al-Maadeed S. A review of video surveillance systems. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2021. Vol. 77. DOI: 10.1016/j.jvcir.2021.103116.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-22>

УДК 004.588

Озерчук Ігор Михайлович, провідний науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0001-7011-0772>

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, м. Київ, Україна

BLUETOOTH LOW ENERGY, ЯК ОСНОВА ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ПРИ НАДМАЛОМУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННІ

Озерчук І.М. Bluetooth Low Energy, як основа передачі даних при надмалому енергоспоживанні. У статті розкрито Bluetooth Low Energy, як основу передачі даних при надмалому енергоспоживанні. Детально описано напрямки застосування технології. Наголошено, що у BLE зв'язок між пристроями може відбуватися відповідно до двох основних шаблонів взаємодії каналного рівня: два пристрої можуть діяти або як ширококомунікатор та сканер, коли ширококомунікатор односпрямовано передає дані, які можуть бути отримані сканером; або як ведучий і ведений, при цьому між пристроями встановлено з'єднання, і вони можуть обмінюватися даними в двох напрямках. Підкреслено, що специфікація Bluetooth Low Energy дозволяє гнучко налаштовувати режими збору довільних даних з урахуванням необхідної швидкості їх збору та бажаного рівня енергозбереження. Графічно наведено рівні реалізації Bluetooth Low Energy, запропоновано переваги технології та її недоліки. При цьому наголошено, що споживання електроенергії може змінюватись у широких межах. Воно залежить від реалізації пристрою, різних параметрів протоколу та чіпсету. Типове споживання BLE-трансівера під час передачі даних зазвичай не перевищує 15 мА. Зазначається, що Bluetooth Low Energy призначений для передачі даних каналом з низькою пропускну здатністю, а використання Bluetooth Low Energy для додатків з великим обсягом даних, що часто передаються, істотно збільшує споживання електроенергії і зводить нанівель основну перевагу BLE. Таким чином, підкреслено, що мінімізація використання радіозв'язку, наскільки це можливо, дає змогу досягти мінімального рівня споживання енергії. Описано контролер BlueNRG-LP, який рекомендується використовувати для технології Bluetooth Low Energy, як наслідок використання – висока продуктивність із надзвичайно низьким споживанням. Наголошується на апаратних функціях BlueNRG-LP, які забезпечують розширену апаратну підтримку безпеки.

Ключові слова: Bluetooth Low Energy, передача даних, мережа, енергоспоживання, надійність, технологія, інновація, мікросхема, контролер.

Ozerchuk I. Bluetooth Low Energy, as the basis of data transmission with ultra-low energy consumption. The article describes Bluetooth Low Energy as the basis for data transmission with ultra-low energy consumption. The areas of application of the technology are described in detail. It is emphasized that in BLE, communication between devices can take place according to two main patterns of channel-level interaction: two devices can act either as a broadcaster and a scanner, when the broadcaster unidirectionally transmits data that can be received by the scanner; or as host and host, while a connection is established between the devices, and they can exchange data in two directions. It is emphasized that the Bluetooth Low Energy specification allows you to flexibly configure arbitrary data collection modes, taking into account the required speed of their collection and the desired level of energy saving. The levels of implementation of Bluetooth Low Energy are graphically presented, the advantages of the technology and its disadvantages are suggested. At the same time, it was emphasized that electricity consumption can vary widely. It depends on the device implementation, various protocol parameters and chipset. The typical consumption of a BLE transceiver during data transmission usually does not exceed 15 mA. It is noted that Bluetooth Low Energy is designed to transmit data over a low-bandwidth channel, and using Bluetooth Low Energy for applications with a large volume of frequently transmitted data significantly increases power consumption and negates the main advantage of BLE. Thus, it is emphasized that minimizing the use of radio communication as much as possible allows to achieve the minimum level of energy consumption. The BlueNRG-LP controller is described, which is recommended for Bluetooth Low Energy technology, as a result of its use - high performance with extremely low consumption. The hardware features of BlueNRG-LP are emphasized, which provide advanced hardware support for security.

Key words: Bluetooth Low Energy, data transfer, network, power consumption, reliability, technology, innovation, chip, controller.

Вступ та постановка проблеми. В умовах сьогодення, мережеві технології стрімко розвиваються і застосовуються вже не лише у комп'ютерах, ноутбуках, планшетах та смартфонах. Тепер до мережі підключено безліч різних розумних пристроїв, таких як пральні машини, роботопилососи, дверні замки, іграшки та багато іншого. Асортимент існуючих та потенційних пристроїв для IoT величезний. По суті, до пристроїв IoT можна віднести всі пристрої, оснащені мікросхемами для збирання та передачі даних через мережу. Зручність використання таких пристроїв полягає у можливості простого керування ними зі смартфона. Однак IoT активно використовується не лише окремими користувачами: компанії та навіть цілі міста дедалі більше впроваджують інтелектуальні технології для економії часу та грошей. IoT створює можливості для прямої інтеграції фізичного світу в комп'ютерні системи, що веде до підвищення ефективності, економічних вигод та скорочення людських зусиль у будь-якій галузі.

Технологія передачі – найважливіший елемент будь-якої системи IoT. Найбільш важливими вирішальними факторами для вибору бездротових протоколів є пропускну спроможність, дальність передачі, безпека, сумісність та енергоспоживання. Класичний Bluetooth зайняв свою нішу в

аудіопристроях з бездротовим підключенням до ноутбуків і мобільних телефонів, тоді як Bluetooth Low Energy (BLE) перетворився на універсальний інструмент зв'язку для батарейних датчиків, пультів керування та брелоків безконтактного доступу завдяки економічності та надмалому енергоспоживанню.

Однак, варто наголосити на стрімкому розвитку мікротехніки та постійному вдосконаленні контролерів, що є основою будь-якої технології передачі. Так, розширення лінійки сприяє не тільки максимізації швидкості передачі даних, підвищенню пропускної здатності, зниженню енергоспоживання, але й формуванню певного переліку вимог, технічних параметрів та особливостей впровадження. Саме це вимагає детального дослідження та актуалізації кожного окремого пристрою до новітніх технологічних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Науковим підґрунтям за темою дослідження є низка робіт науковців праця яких направлена на формування, структуризацію та вдосконалення технології передачі даних за сферами застосування.

Так, ґрунтовною є праця А.А. Пакули та Є.А. Паламарчука [1] які розглянули та проаналізували особливості використання технології Bluetooth Low Energy (BLE) та методи її використання для взаємодії з розумними пристроями в мобільній розробці на платформі Android.

О. І. Сидоренко [2] розкрив інноваційні технології розширення спектру дії Bluetooth. Здійснив огляд специфіки формування спектру охопту сигналу. Структурував механізм дії мережі Bluetooth, яка дозволяє передавати інформацію між своїми вузлами через фізичний рівень, при цьому вузли мережі ретранслюють повідомлення і динамічно працюють для транспортування інформації по мережі.

В роботі [3] проведено дослідження задач побудови бездротових сенсорних мереж, основним етапом їх вирішення є розробка моделей опису сенсорної мережі та відповідних методів, технологій забезпечення необхідних параметрів якості функціонування сенсорної мережі.

І.Б. Галелюка [4] розглянув особливості моделювання та оцінювання параметрів бездротової сенсорної мережі, що її призначено для моніторингу медично-фізіологічних параметрів стану людини.

Математичну модель багатокритеріальної оптимізації якості обслуговування сенсорних мереж з використанням принципу справедливості запропонували Н. М. Довженко, В. В. Собчук та М. О. Коваль [5].

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Sauter Martin [6], Freund Michael, Dorsch Rene, Harth Andreas [7], Natgunanathan Iynkaran, Fernando Niroshinie, Loke Seng, Weerasuriya Charitha [8], Sun Dazhi, Tian Yangguang [9], Ližbetin Ján, Pečman Jan [10], Liu Chendong, Zhang Yilin, Zhou Huanyu [11], Ndebugre Moses, Yildirim Tülay [12], Pang Bozheng, Claeys Tim, Vankeirsbilck Jens, T'Jonck Kristof, Hallez Hans, Boydens Jeroen [13], Antonioli Daniele, Tippenhauer Nils Ole, Rasmussen Kasper [14], Leonardi Luca, Bello Lucia, Patti Gaetano [15], Cäsar Matthias, Pawelke Tobias, Steffan Jan, Terhorst Gabriel [16], Karoliny Julian, Blazek Thomas, Springer Andreas, Bernhard H.-P. [17], Pyt Patryk, Jankowski-Mihulowicz Piotr, Węglarski Mariusz [18] та інші.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за окресленою тематикою, питання принципів Bluetooth Low Energy, як основи передачі даних при надмалому енергоспоживанні залишається відкритим та потребує детального опрацювання відносно новітніх стандартів технічного регулювання.

Постановка завдання. Розкрити Bluetooth Low Energy, як основу передачі даних при надмалому енергоспоживанні.

Викладення основного матеріалу дослідження. В умовах сьогодення, комунікація відіграє життєво важливу роль у багатьох сучасних програмах. Порівняно з традиційними дротовими механізмами зв'язку технології бездротового зв'язку потрібні через переваги, які вони пропонують, включаючи ефективність, доступність, гнучкість, зменшення проблем встановлення та економію коштів.

Bluetooth Low Energy – це бездротова персональна мережева технологія, розроблена Bluetooth Special Interest Group. Слідом за Bluetooth 4.x у 2017 році була випущена відповідна специфікація Mesh Model для Bluetooth 5. Вона фактично збільшила радіус дії вчетверо за рахунок збільшення потужності передачі та закодованого фізичного рівня; подвоїла швидкість за рахунок зниження часу передачі символу порівняно з Bluetooth 4.x; і забезпечила восьмикратне збільшення потужності трансляції даних за рахунок збільшення тривалості передачі рекламних даних Bluetooth Low Energy. Порівняно з класичним Bluetooth, Bluetooth Low Energy мав на меті значно зменшити споживання електроенергії та вартість; зберігаючи аналогічний діапазон зв'язку.

Інтегральні схеми Bluetooth з низьким енергоспоживанням використовують радіо передачу, тому оновлення специфікації можна внести через оновлення мікропрограми. Сучасні мобільні пристрої зазвичай випускаються з підтримкою апаратного та програмного забезпечення як класичного Bluetooth, так і Bluetooth Low Energy.

Bluetooth Low Energy не сумісний із класичним протоколом Bluetooth Basic Rate/Enhanced Data Rate (BR/EDR). Специфікація Bluetooth 4.0 дозволяє пристроям використовувати одну або обидві системи LE та BR/EDR. Очікується, що виробники впровадять відповідні специфікації для своїх пристроїв, щоб забезпечити сумісність.

Пристрій з протоколом Bluetooth Low Energy може використовувати кілька профілів. Більшість профілів додатків базується на загальному профілі атрибутів, який визначає специфікації для надсилання та отримання коротких фрагментів даних, відомих як атрибути, через зв'язок із низьким енергоспоживанням. Термінологія базується на наступному:

Клієнт: пристрій, який ініціює запити та приймає відповіді, наприклад смартфон.

Сервер: пристрій, який отримує запити та повертає відповіді, наприклад датчик температури.

Характеристика: значення даних, що передаються між клієнтом і сервером, наприклад поточне значення температури.

Сервіс / послуга: набір пов'язаних характеристик, які працюють разом для виконання певної функції, наприклад термометр.

Дескриптор: необов'язкові параметри, пов'язані з характеристиками для надання додаткової інформації, наприклад дескриптор одиниці вимірювання температури.

Послуги, характеристики та дескриптори разом називаються атрибутами та ідентифікуються універсальними унікальними ідентифікаторами (UUID). Будь-який розробник може вибрати випадковий UUID для приватного використання. Для ефективності ці ідентифікатори представлені як 16-бітні або 32-бітові значення в протоколі замість 128 біт, необхідних для повного UUID. Повний список зберігається в документі Bluetooth Assigned Numbers.

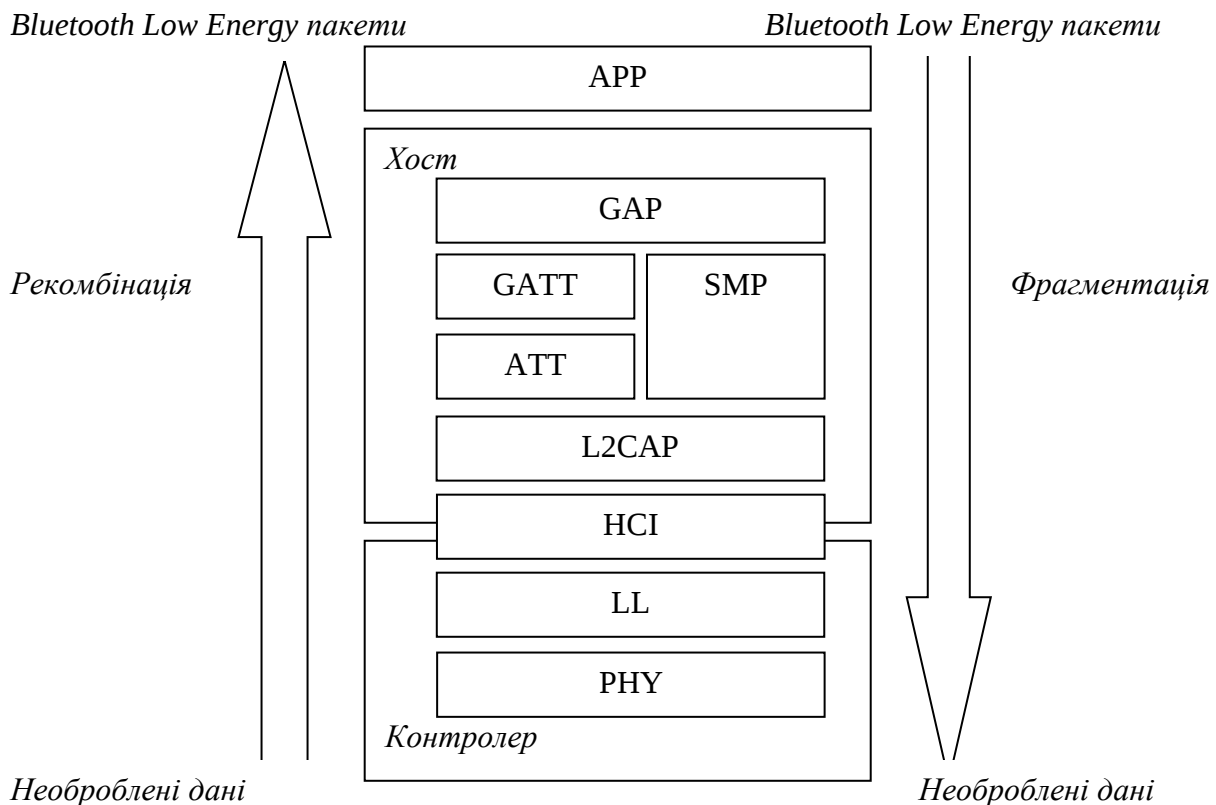


Рис. 1 – Рівні реалізації Bluetooth Low Energy [19]

Generic Attribute Profile надає ряд команд для клієнта, щоб знайти інформацію про первинні/вторинні служби сервера, характеристики про служби; і дескриптори для різних

характеристик. Він також пропонує сповіщення та індикацію для клієнта; для конкретної характеристики. Це дозволяє уникнути необхідності опитування сервера, що вимагало б постійної роботи радіосхем серверів.

Сумісні мобільні операційні системи включають:

1. iOS 5 і новіші версії
2. Android 4.3 і новіші версії
3. Windows 8 і новіші версії
4. Blackberry 10
5. macOS 10.10
6. Linux 3.4 і новіші версії через BlueZ 5.0
7. Windows Phone 8.1
8. Unison OS 5.2

На відміну від класичного Bluetooth, який є схемою FHSS, Bluetooth Low Energy класифікується як система, що використовує методи цифрової модуляції або прямої послідовності з розширеним спектром. Bluetooth Low Energy використовує ті самі радіочастоти (діапазон 2,400–2,4835 ГГц ISM), що й класичний Bluetooth, що дозволяє дворежимним пристроям спільно використовувати одну радіоантену. Однак він має 40 каналів 2 МГц замість 79 каналів 1 МГц. Bluetooth Low Energy використовує модуляцію зсуву частоти за Гауссом, подібну до класичної схеми базової швидкості Bluetooth. Швидкість передачі даних становить 1 Мбіт/с у Bluetooth 4.x і 2 Мбіт/с у Bluetooth 5. Максимальна потужність передачі становить 10 мВт у Bluetooth 4.x і 100 мВт у Bluetooth 5. Bluetooth Low Energy використовує стрибкоподібну зміну частоти, як класичний Bluetooth для усунення проблем із вузькосмуговими перешкодами.

Пристрої Bluetooth Low Energy ідентифікуються за допомогою процедури, яка базується на трансляції рекламних пакетів за допомогою трьох окремих каналів, щоб зменшити перешкоди. Рекламний пристрій надсилає пакет принаймні по одному з цих трьох каналів з періодом повторення, який називається рекламним інтервалом. Щоб зменшити ймовірність кількох послідовних зіткнень, до кожного рекламного інтервалу додається випадкова затримка до 10 мілісекунд. Сканер прослуховує канал протягом періоду, що називається вікном сканування, яке періодично повторюється з кожним інтервалом сканування.

Bluetooth Low Energy знайшов своє застосування в галузі охорони здоров'я, фітнесу, радіомаяків, сенсорних мереж, безпеки та індустрії домашніх розваг.

Bluetooth Low Energy призначений для роботи пристроїв з низьким енергоспоживанням. Пристрої з периферійними та центральними ролями мають різні вимоги до живлення. Енергоефективність периферійних пристроїв Bluetooth з низьким енергоспоживанням дозволяє їм працювати протягом 1-2 років із батареєю типу «таблетка» ємністю 1000 мАг. Навпаки, безперервне сканування може споживати 1000 мАг за кілька годин. З новими наборами мікросхем і прогресом у програмному забезпеченні телефони Android і iOS тепер мають незначне енергоспоживання в реальних сценаріях використання Bluetooth Low Energy.

1. Профілі сітки: у сітчастій мережі Bluetooth кожен пристрій може передавати інформацію іншим пристроям Bluetooth з низьким енергоспоживанням, створюючи ефект сітки. Профіль Bluetooth mesh базується на профілі загального доступу.

2. Профілі охорони здоров'я: існують спеціальні профілі для охорони здоров'я, включаючи профіль вимірювання артеріального тиску, профіль вимірювання температури, профіль монітора глюкози в крові тощо.

3. Профілі спорту та фітнесу: швидкість їзди на велосипеді, профіль пульсу, профіль розташування та навігації тощо.

4. Профілі підключення до Інтернету: підтримка Інтернет-протоколу.

5. Загальний профіль датчиків: зондування навколишнього середовища, служба даних користувача, тощо.

6. HID Профіль підключення: профілі для бездротових мишей, клавіатур та інших пристроїв із підтримкою Bluetooth Low Energy.

7. Профілі визначення наближення: геолокація, виявлення датчика наближення тощо.

8. Сповіщення та часові профілі: стан телефонного сповіщення, сповіщення про вхідний дзвінок, інформація про часовий пояс тощо.

9. Профіль служби батареї: сповіщення про стан батареї та рівень заряду батареї тощо.

Переваги Bluetooth Low Energy

1. Надзвичайно низькі вимоги до пікової, середньої потужності та режиму очікування. Енергоефективність функції Bluetooth Low Energy робить її ідеальною для пристроїв, які тривалий час працюють від батарейок або пристроїв, що збирають енергію.

2. Невеликий розмір і низька вартість: стандартизована архітектура розробки додатків полегшує розробку та розгортання. Таким чином, інноваційні бездротові пристрої можна швидко розробити та розгорнути за допомогою високошвидкісної технології Bluetooth. Bluetooth Developer Studio – це найвідоміший інструмент, який розробники мобільних пристроїв і програмного забезпечення можуть використовувати для розробки та налагодження своїх додатків Bluetooth Low Energy. Він є безкоштовним для використання, дозволяє розробляти послуги профілю Generic Attribute і характеристики, забезпечує автоматичне створення вихідного коду за допомогою безкоштовних плагінів постачальника; і дозволяє тестувати фізичний пристрій за допомогою ключа Bluetooth. Програма емулятора клієнта дуже корисна для тестування нових змін до або під час розгортання. Це дозволяє сканувати поблизу рекламні пристрої Bluetooth Low Energy, підключатися до одного з цих пристроїв, виявляти їхні характеристики, а також читати/записувати значення характеристик.

3. Розширення довжини даних: розмір пакета може обробляти більшу кількість корисного навантаження, до 251 Б замість 27 Б.

4. Сумісність із великою базою встановлених платформ: вбудована підтримка технології Bluetooth Low Energy у кожній основній операційній системі дозволяє здійснити підключення для мільярдів пристроїв, від побутової техніки та систем безпеки до пристроїв Інтернету речей.

5. Безпека: забезпечує безпеку державного рівня завдяки 128-бітному шифруванню даних AES.

6. Широкий діапазон: забезпечує покриття дуже великих територій.

Недоліки Bluetooth Low Energy

1. Функція швидкості Bluetooth 5 «2x» вимагає оновлення апаратного забезпечення, тому старіші пристрої/чіпи/модулі не підтримують її.

2. Щоб досягти вищої пропускної здатності, пристрої Bluetooth з низьким енергоспоживанням, які спілкуються один з одним, повинні підтримувати новий LE 2M PHY.

3. Теоретична пропускна здатність 2 Мбіт/с не може бути досягнута через обмеження на кількість пакетів на інтервал з'єднання, затримку між кадрами, передачу порожніх пакетів і витрати пакетів.

4. Неможливо використовувати Bluetooth BR/EDR для зв'язку з пристроєм Bluetooth Low Energy або навпаки.

На сьогодні, для технології BLE рекомендуються контролери серій BlueNRG-2, BlueNRG-LP та STM32WB55.

BlueNRG-LP – це програмована Bluetooth-система-на-кристалі із наднизьким енергоспоживанням. В її основі – нові радіочастотні IP-ядра STMicroelectronics діапазону 2.4ГГц, що поєднують високу продуктивність із надзвичайно низьким споживанням (як наслідок – тривалим терміном автономної роботи).

BlueNRG-LP сумісний зі специфікацією BLE SIG версії 5.2, може будувати мережі типу «точка-точка», «зірка» та пористі мережі Bluetooth mesh, що дозволяє створювати надійні великомасштабні мережі пристроїв. BlueNRG-LP побудований на ядрі Cortex-M0+, яке може працювати з частотою до 64 МГц, також містить співпроцесор BlueNRG core (на базі DMA) для виконання критично важливих операцій синхронізації протоколу BLE.

Основні функції специфікації BLE 5.2, що підтримуються:

- швидкість передачі даних 2 Мбіт/с;
- велика дальність (режим LongRange, кодований PHY);
- розширення adv-пакетів;
- покращений алгоритм вибору каналу;
- кешування GATT;
- апаратна підтримка одночасного підключення «провідний/відомий» та кілька ролей одночасно;
- підтримка розширеної довжини пакетів.

Крім того, BlueNRG-LP забезпечує розширену апаратну підтримку безпеки за рахунок спеціальних апаратних функцій:

- генератор справжніх випадкових чисел (RNG);

- шифрування AES, максимальний 128-розрядний співпроцесор безпеки;
- прискорювач відкритих ключів (РКА);
- блок обчислення CRC;
- 64-розрядний унікальний ідентифікатор;
- захист від читання та запису флеш-пам'яті.

Висновки. У роботі розкрито Bluetooth Low Energy, як основу передачі даних при надмалому енергоспоживанні. Bluetooth Low Energy має можливість замінити пропріетарні протоколи і стає де-факто стандартом бездротового зв'язку для малопотужних та недорогих IoT-пристроїв. Приймачі BlueNRG-LP стандарту Bluetooth Low Energy підходять для використання в найширшому спектрі пристроїв персонального призначення, в системах збору та обліку даних, знаходять широке застосування в промисловій та домашній автоматизації.

Перспективами подальшого дослідження є розробка датчику температури на базі Bluetooth Low Energy із застосуванням BlueNRG-LP.

Список бібліографічного опису

1. Пакула А. А. Використання технології Bluetooth Low Energy для розумних пристроїв в мобільній розробці [Текст] / А. А. Пакула, Є. А. Паламарчук // Матеріали XV міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація», Одеса, 20-21 жовтня 2022 р. – 2022. С. 166-168.
2. Сидоренко О. І. Інноваційні технології розширення спектру дії Bluetooth / Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 2022. №73. С. 73-79.
3. Дослідження задач побудови бездротових сенсорних мереж / В. М. Джулій, А. В. Краснік, Є. С. Ленков, М. М. Охромович, Л. О. Ряба // Хмельницький національний університет, 2022. С. 51-65. DOI: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2022/75-06>
4. Галелюка, І.Б. Моделювання та оцінювання параметрів бездротової сенсорної мережі медичного призначення / І.Б. Галелюка // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. 2018. № 17. С.47 – 52.
5. Математична модель багатокритеріальної оптимізації якості обслуговування сенсорних мереж з використанням принципу справедливості запропонували / Н. М. Довженко, В. В. Собчук, М. О. Коваль // Телекомунікаційні та інформаційні технології, 2019. № 3. С. 90-97. DOI: 10.31673/2412-4338.2019.039097
6. Sauter Martin. (2021). Bluetooth and Bluetooth Low Energy. DOI: 10.1002/9781119714712.ch8.
7. Freund Michael, Dorsch Rene, Harth Andreas. (2022). Applying the Web of Things Abstraction to Bluetooth Low Energy Communication. DOI: 10.48550/arXiv.2211.12934.
8. Natgunanathan Iynkaran, Fernando Niroshinie, Loke Seng, Weerasuriya Charitha. (2023). Bluetooth Low Energy Mesh: Applications, Considerations and Current State-of-the-Art. Sensors. 23. 1826. DOI: 10.3390/s23041826.
9. Sun Dazhi, Tian Yangguang. (2022). Address Privacy of Bluetooth Low Energy. Mathematics. 10. 4346. DOI: 10.3390/math10224346.
10. Ližbetin Ján, Pečman Jan. (2023). Possibilities of Using Bluetooth Low Energy Beacon Technology to Locate Objects Internally: A Case Study. Technologies. 11. 57. DOI: 10.3390/technologies11020057.
11. Liu Chendong, Zhang Yilin, Zhou Huanyu. (2021). A Comprehensive Study of Bluetooth Low Energy. Journal of Physics: Conference Series. 2093. 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/2093/1/012021.
12. Ndebugre Moses, Yildirim Tülay. (2022). Bluetooth Low Energy-based Indoor Localization using Artificial Intelligence. The European Journal of Research and Development. 2. 1-15. DOI: 10.56038/ejrd.v2i3.102.
13. Pang Bozheng, Claeys Tim, Vankeirsbilck Jens, TJonck Kristof, Hallez Hans, Boydens Jeroen. (2022). A Novel Model to Quantify the Impact of Transmission Parameters on the Coexistence Between Bluetooth Low Energy Pairs. IEEE Internet of Things Journal. PP. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3209874.
14. Antonioli Daniele, Tippenhauer Nils Ole, Rasmussen Kasper. (2020). Key Negotiation Downgrade Attacks on Bluetooth and Bluetooth Low Energy. ACM Transactions on Privacy and Security. 23. 1-28. DOI: 10.1145/3394497.
15. Leonardi Luca, Bello Lucia, Patti Gaetano. (2023). RESEMBLE: A Real-Time Stack for Synchronized Mesh Mobile Bluetooth Low Energy Networks. Applied System Innovation. 6. 19. DOI: 10.3390/asi6010019.
16. Cäsar Matthias, Pawelke Tobias, Steffan Jan, Terhorst Gabriel. (2022). A survey on Bluetooth Low Energy security and privacy. Computer Networks. 205. 108712. DOI: 10.1016/j.comnet.2021.108712.
17. Karoliny Julian, Blazek Thomas, Springer Andreas, Bernhard H.-P. (2023). Predicting the Channel Access of Bluetooth Low Energy.
18. Pyt Patryk, Jankowski-Mihulowicz Piotr, Węglarski Mariusz. (2023). Bluetooth Low Energy Beacon Powered by the Temperature Difference. Electronics. 12. 1278. DOI: 10.3390/electronics12061278.
19. Intro to Bluetooth Low energy / Mohammad Afaneh // Novel Bits, LLC; 1st edition. 2018. С. 65-121.

References

1. A. A. Pakula The use of Bluetooth Low Energy technology for smart devices in mobile development [Text] / A. A. Pakula, E. A. Palamarchuk // Proceedings of the XV international scientific and practical conference "Information technologies and automation", Odessa, October 20-21, 2022 - 2022. P. 166-168.
2. Sydorenko O. I. Innovative technologies for expanding the range of Bluetooth / Interuniversity collection "SCIENTIFIC NOTES". Lutsk, 2022. No. 73. P. 73-79.
3. Research on the problems of building wireless sensor networks / V. M. Julii, A. V. Krasnik, E. S. Lenkov, M. M. Okhramovych, L. O. Ryaba // Khmelnytskyi National University, 2022. P. 51-65 . DOI: <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2022/75-06>

4. Halelyuka, I.B. Modeling and evaluation of wireless sensor network parameters for medical use / I.B. Halelyuka // Computer tools, networks and systems. 2018. No. 17. P.47-52. 5. A ma
5. thematical model of multi-criteria optimization of the quality of service of sensor networks using the principle of justice was proposed / N. M. Dovzhenko, V. V. Sobchuk, M. O. Koval // Telecommunications and information technologies, 2019. No. 3. P. 90-97 . DOI: 10.31673/2412-4338.2019.039097
6. Sauter Martin. (2021). Bluetooth and Bluetooth Low Energy. DOI: 10.1002/9781119714712.ch8.
7. Freund Michael, Dorsch Rene, Harth Andreas. (2022). Applying the Web of Things Abstraction to Bluetooth Low Energy Communication. DOI: 10.48550/arXiv.2211.12934.
8. Natgunanathan Iynkaran, Fernando Niroshinie, Loke Seng, Weerasuriya Charitha. (2023). Bluetooth Low Energy Mesh: Applications, Considerations and Current State-of-the-Art. Sensors. 23. 1826. DOI: 10.3390/s23041826.
9. Sun Dazhi, Tian Yangguang. (2022). Address Privacy of Bluetooth Low Energy. Mathematics. 10. 4346. DOI: 10.3390/math10224346.
10. Ližbetin Ján, Pečman Jan. (2023). Possibilities of Using Bluetooth Low Energy Beacon Technology to Locate Objects Internally: A Case Study. Technologies. 11. 57. DOI: 10.3390/technologies11020057.
11. Liu Chendong, Zhang Yilin, Zhou Huanyu. (2021). A Comprehensive Study of Bluetooth Low Energy. Journal of Physics: Conference Series. 2093. 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/2093/1/012021.
12. Ndebugre Moses, Yildirim Tülay. (2022). Bluetooth Low Energy-based Indoor Localization using Artificial Intelligence. The European Journal of Research and Development. 2. 1-15. DOI: 10.56038/ejrnd.v2i3.102.
13. Pang Bozheng, Claeys Tim, Vankeirsbilck Jens, TJonck Kristof, Hallez Hans, Boydens Jeroen. (2022). A Novel Model to Quantify the Impact of Transmission Parameters on the Coexistence Between Bluetooth Low Energy Pairs. IEEE Internet of Things Journal. PP. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3209874.
14. Antonioli Daniele, Tippenhauer Nils Ole, Rasmussen Kasper. (2020). Key Negotiation Downgrade Attacks on Bluetooth and Bluetooth Low Energy. ACM Transactions on Privacy and Security. 23. 1-28. DOI: 10.1145/3394497.
15. Leonardi Luca, Bello Lucia, Patti Gaetano. (2023). RESEMBLE: A Real-Time Stack for Synchronized Mesh Mobile Bluetooth Low Energy Networks. Applied System Innovation. 6. 19. DOI: 10.3390/asi6010019.
16. Căsar Matthias, Pawelke Tobias, Steffan Jan, Terhorst Gabriel. (2022). A survey on Bluetooth Low Energy security and privacy. Computer Networks. 205. 108712. DOI: 10.1016/j.comnet.2021.108712.
17. Karoliny Julian, Blazek Thomas, Springer Andreas, Bernhard H.-P. (2023). Predicting the Channel Access of Bluetooth Low Energy.
18. Pyt Patryk, Jankowski-Miśkiewicz Piotr, Węglarski Mariusz. (2023). Bluetooth Low Energy Beacon Powered by the Temperature Difference. Electronics. 12. 1278. DOI: 10.3390/electronics12061278.
19. Intro to Bluetooth Low energy / Mohammad Afaneh // Novel Bits, LLC; 1st edition. 2018. C. 65-121.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-23>

УДК 621.311.21

Пітух Ігор Романович¹, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-3329-4901>

Сидор Андрій Іванович², к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-4911-7034>

Круліковський Борис Борисович², к.т.н., доцент

<http://orcid.org/0000-0001-7500-336X>

¹Західноукраїнський національний університет, м Тернопіль, Україна

²Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕСИЛАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ МЕРЕЖЕВИХ АРХІТЕКТУРАХ В УМОВАХ ДИНАМІЧНИХ ВПЛИВІВ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ

Пітух І.Р., Сидор А.І., Круліковський Б.Б. Дослідження характеристик пересилання електроенергії у високовольтних мережових архітектурах в умовах динамічних впливів зовнішніх факторів. В роботі класифіковано та досліджено системні характеристики інформаційних інтерактивних систем на основі критерію емерджентності. Запропоновано метод удосконалення алгоритму застосування образно-кластерних моделей в умовах катастрофічних впливів на електромережу

Ключові слова: енергосистеми, критерій емерджентності, електропідстанція, Хеммінгова відстань, Евклідова відстань.

Pituh I., Sydor A., Krulikovskiy B. Study of the characteristics of electricity transmission in high-voltage network architectures under the conditions of dynamic influences of external factors. The work classified and investigated the system characteristics of interactive information systems based on the criterion of emergency. A method of improving the algorithm for the use of image-cluster models in the conditions of catastrophic effects on the power grid is proposed

Keywords: power systems, emergency criterion, electric substation, Hamming distance, Euclidean distance.

Постановка наукової проблеми. У наш час в умовах військової ситуації на території України спостерігаються різкі зміни логістики у структурі високовольтних та промислових електромережах, які обумовлені атмосферно-природними та військовими впливами.

Очевидно, що такі динамічні впливи на магістральну архітектуру високовольтних електромереж та центри розподілу потужностей електроенергії можуть бути адекватно подібні до відповідних динамічних змін у структурах інтерактивних матричних моделях руху даних (ІММРД) [1,2].

Аналіз досліджень. Аналіз процесів пересилання та комунікації потужностей у мережових архітектурах високовольтної та промислової електроенергетики однозначно може моделюватися та досліджуватися згідно розроблених теоретичних, методологічних та техніко-інформаційних положень ІММРД.

При цьому, поряд з існуючою проблемою діагностування станів локального контролю відхилень, відхилень станів енергосистем (ЕС) від норми, шляхом регулювання відповідних характеристик відхилень їх станів по амплітуді, динаміці (частоті), фазі та їх взаємкореляції в умовах значного зростання ймовірностей відмов обладнання магістральної логістики, центрів розподільчих та трансформуючих комунікацій пріоритетно актуальною проблемою є дослідження та розробка відповідної теорії, методології та техніки по оцінці ступеня деградації характеристики системи.

На основі теоретичних положень матрично-взаємкореляційної логіко-статистичної інформаційної моделі (ЛСІМ-5) [3], яка базується на розрахунках матричної взаємкореляційної моделі на основі теорії мультиплікативних та Хемінгово-модульних нормованих коефіцієнтів типу:

$$\rho_{ij} = f(G_{ij}), \text{ де } \rho_{ij} = \frac{R_{ij}}{\sqrt{D_i + D_j}},$$

$$Z_{ij} = \sum |Z_i - Z_j|, \text{ де } Z_1 = \sum_{i=1}^m Z_{i1}, Z_2 = \sum_{i=1}^m Z_{i2} \dots Z_m = \sum_{i=1}^m Z_{im}$$

у комунікаційних та розподільчих центрах комунікації та розподілення електроенергії рис.1 [3].

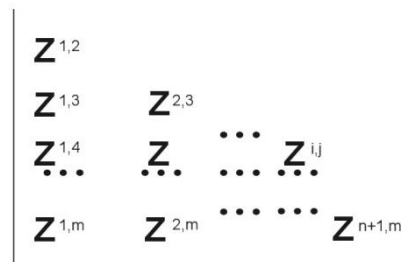


Рис.1 – Матриця розрахунку Хеммінгової віддалі

Пріоритетною характеристикою архітектури системи електропостачання є оцінка її емерджентності, яка відповідає інформаційному рівню інтелектуальності та надійності і розраховується згідно запропонованого коефіцієнта емерджентності: $K_e = \frac{N_z}{N_e}$, де N_z - кількість

одно напрямлених та двонаправлених комунікаційних зв'язків, N_e – кількість класифікованих елементів системи (джерело електроенергії (ДЕ), лінія електропередач (ЛЕП), споживач електроенергії (СЕ)).

Також важливою контрольованою характеристикою електромереж є динамічна зміна параметрів споживання активної та реактивної енергії, в умовах раптових відключень та включень енергопостачальників та енергоспоживачів.

Мета роботи. Метою дослідження є розробка підходу до застосування теорії, методології та оцінки емерджентності різних архітектур енергосистем на основі ІММРД та оцінки коефіцієнта емерджентності..

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Розроблена класифікація та досліджені авторами системні характеристики інформаційних інтерактивних систем на основі критерію емерджентності [4], з позицій універсальності процесів моделювання різних фізичних об'єктів, може успішно бути застосована при дослідженні динаміки структурних та комунікаційних змін у середовищі архітектур високовольтних електромереж. Розглянемо приклади локальних пошкоджень у середовищі монопольної архітектури пересилання електроенергії згідно класифікації типів архітектур ІРКС [4,5]:

1) монопольна архітектура (рис. 2)

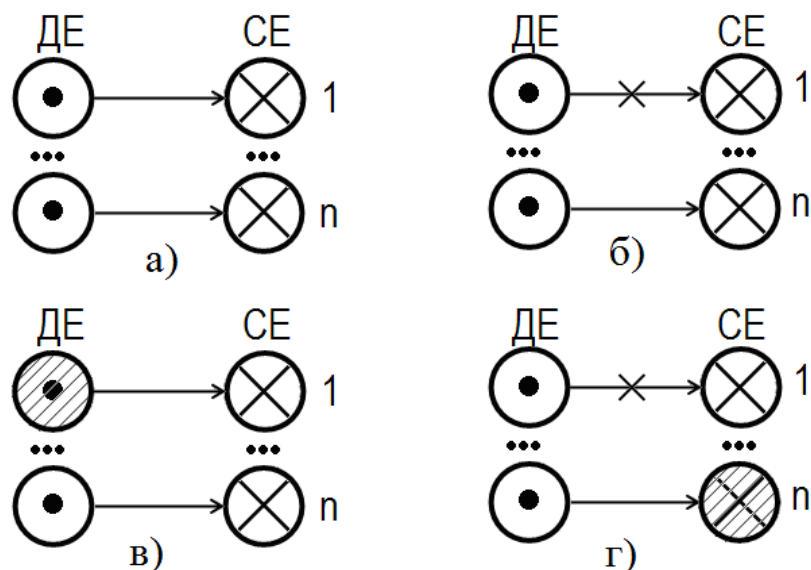


Рис. 2 – Монопольна архітектура розподілу електроенергії (ЕЕ)

а) за умови штатної роботи; б) при відмові чи пошкодженні електромережі, коротких замиканнях та інше; в) за умови пошкодження джерела ЕЕ; г) за умови пошкодження СЕ.

Така архітектура пересилання електроенергії характеризується високим рівнем надійності за рахунок глибокого розпаралелення енергетичних потоків від ДЕ до автономних споживачів ЕЕ.

У той же час, суттєвим недоліком такої архітектури є відсутність взаємозамінних логістичних комунікацій та резервування процесів пересилання електроенергії.

Архітектура ЕС з наявною комутацією поставок електроенергії в умовах її дефіциту показана на рис.3.

2) архітектура з комутацією каналів;

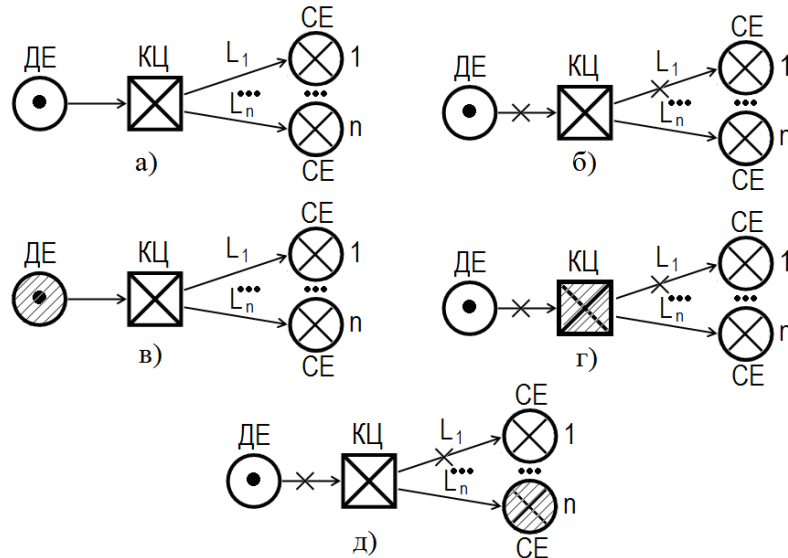


Рис. 3 – Архітектура ЕС з комутацією поставок електроенергії в умовах її дефіциту за умови:
а) штатного стану електромережі; б) відмови однієї з ЛЕП; в) відмови ДЕ; г) відмови комунікаційного центру; д) відмови одного або багатьох споживачів.

КЦ – комунікаційний центр (електропідстанція, ЛЕП).

Перевагою такої неінтерактивної архітектури є більш високий рівень емерджентності та надійності, який визначається відношенням кількості мережевих однонаправлених зв'язків між ДЕ, ЕП та СЕЕ.

В високовольтних електромережах при відповідних комутаціях між ДЕ та КЦ реалізується можливість інтерактивного двонаправленого пересилання ЕЕ рис.4.

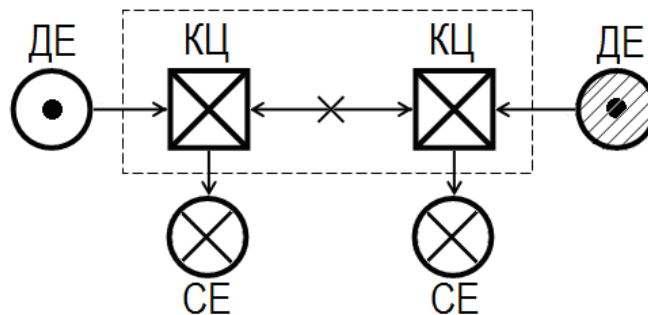


Рис.4 – Приклад інтерактивного пересилання електроенергії між КЦ

Аналіз оцінки емерджентності такої архітектури, при відмовах компонентів електромережі, класифікується наступними випадками:

1) лінія ЛЕП між комунікаційними центрами розірвана, що відповідає монопольній архітектурі, яку ми розглянули, і відповідає оцінці емерджентності у монопольній архітектурі;

2) при відмові одного з ДЕ і з'єднання ЛЕП між КЦ, оцінка емерджентності розраховується згідно характеристик магістральної архітектури, при цьому ЛЕП здійснює двонаправлене пересилання електроенергії.

Принциповим недоліком такої архітектури високовольтної ЛЕП є низький рівень надійності та втрати емерджентності при втраті комунікації рис. 3 (а,б,в,г,д). У першому випадку зниження

надійності та відповідної емерджентності розраховуємо згідно виразу: $K_e = \frac{1 + \sum_{i=1}^m i}{1 + n + n}$, у випадку

відмов у розпаралелених ділянках електромережі, відповідно у випадку відмов послідовно

з'єднаних компонентів електромереж оцінка емерджентності розраховується згідно виразу:

$$K_e = \frac{1 \cdot \sum_{i=1}^m i}{1 + n + m}, \text{ де } 1 - \text{це ДЕ}; n - \text{кількість СЕ}; m - \text{кількість пошкоджених ліній комутації } i = \overline{1, m}.$$

Недоліком 2-ї архітектури електромережі (ЕМ) є наявність різної значимості відмов обладнання на зміну емерджентності K_e , тобто:

$$1) \text{ відмові ДЕ } DE=0, K_e = \frac{0}{\dots} = 0;$$

$$2) \text{ відмові однієї або } m \text{ з } n \text{ наявних ЛЕП відповідна зміна } K_e \text{ згідно виразів: } K_e = \frac{1 \cdot m}{1 + n + m}$$

$$\text{, якщо } m = n \text{ то } K_e = \frac{1 \cdot 0}{1 + n + m} = 0, \text{ в іншому випадку } K_e = \frac{1 \cdot m}{1 + m + n} = \frac{m}{1 + n + m}.$$

На рис. 5 приведена структура енергосистеми з магістральною архітектурою.

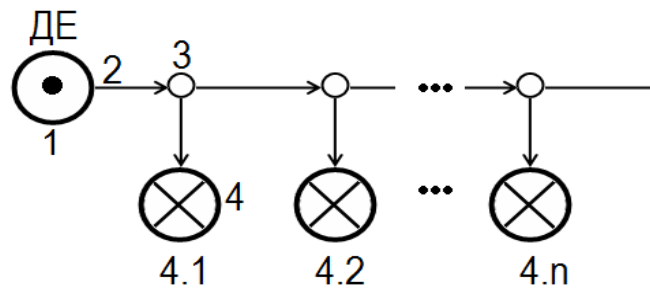


Рис. 5 – Архітектура ЕМ з магістральною архітектурою

Для розрахунку емерджентності такої архітектури введемо нумерацію компонентів такої мережі: 1- ДЕ; 2-ЛЕП; 3- приєднання (трансформаторні підстанції (ТП)); 4- СЕ.

Така архітектура високовольтної ЛЕП характеризується особливістю, оскільки у її структурі присутні ТП (приєднувачі) і відсутні розподільчі центри (електропідстанції).

Ця структура відповідає промисловим, будинковим або вуличним освітленням і є функціонально найпростіша. Надійність та емерджентність такої електромережі при відмовах ДЕ, ЛЕП, ТП та СЕ розраховується згідно виразу:

$$k_e = \frac{1 \cdot \sum 2}{1 + \sum 3 + \sum 4}; k_e = \frac{0 \cdot \sum 2}{1 + \sum 3 + \sum 4} = 0;$$

Цей аналітичний вираз показує, що при відмові будь якого компонента (1) такої неінтерактивної ЕМ $K_e = 0$. Також, при відмові певної ділянки ЛЕП тільки частина споживачів не буде обслуговуватись: згідно виразу $i + j$ ($i=1, j=0$), де $i + j$ - сумарна кількість споживачів, i та j відповідна кількість споживачів які обслуговуються та не обслуговуються поставкою електроенергії $i=1, j=0$.

При відключенні одного або кількох споживачів емерджентність ЕС буде зменшена і не повністю деградована, а у всіх i -х споживачів виникне надлишок потужності, що також є фактором деградації системи. Ці процеси можуть бути відповідно промодельовані та проілюстровані на основі ІММРД та діаграм змни K_e .

На рис. 6ведений приклад ІММРД яка адекватно моделює стани ЕС з фактами відмов окремих компонентів.

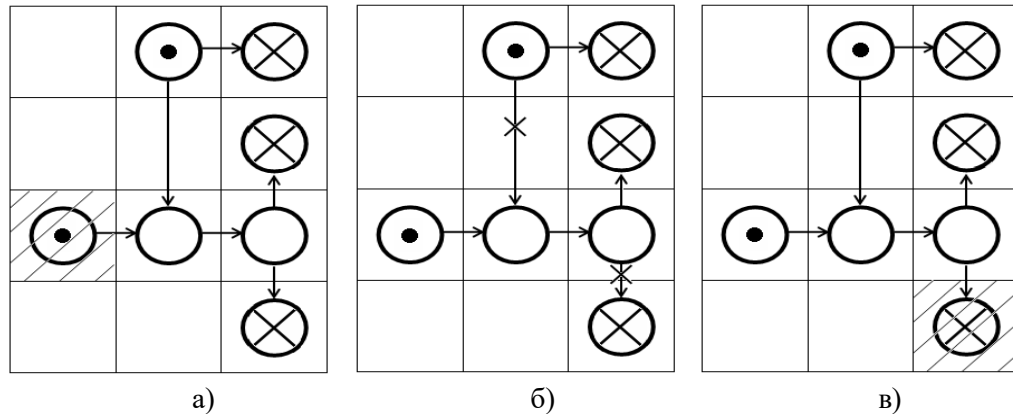


Рис. 6 – ІММРД з відмовою ДЕ (а), ЛЕП (б), СЕ (в).

Аналогічні дослідження, моделювання та оцінка переваг та недоліків зменшення надійності емерджентності різних архітектур ЕС можуть бути здійснені для інших більш складних архітектур. Наприклад, багаторівневих зірково-магістральних та кільцево-магістральних архітектур [6], що виходить за межі об'єму досліджень даної статті.

Можливості двонаправленого (дуплексного) пересилання електроенергії у високовольтних та промислових ЕМ однозначно відповідають ознакам інтерактивності і можуть успішно моделюватися на основі положень теорії інтерактивних, інформаційних, мережових, комунікаційних та накопичувальних характеристик на основі банків даних та баз знань [7]. Також пріоритетною стає розв'язання проблеми дослідження та керування характеристиками надійності енергосистем в умовах їх раптових, під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів, динамічних переходів у квазістаціонарні стани та динамічних змін структурних параметрів у їх стаціонарних архітектурах.

Викладене дозволяє стверджувати, що розроблені теоретичні положення та запропоновані критерії інтерактивності у середовищі комунікацій інформаційних систем можуть бути доцільно та успішно застосовані для відповідно модельованого аналізу змін у станах високовольтних електромереж. При цьому також необхідно враховувати відмінні особливості характеристик емерджентності у порівнянні з інформаційними інтерактивними діалоговими системами, наприклад відсутності значного накопичення потужності енергоресурсів.

У наш час, у світі та Україні, ефективно розвивається відновлювальна енергетика на основі гідро, сонячної та вітрової електроенергетики. Такі енергогенеруючі системи характеризуються певною динамікою зміни генерованих потужностей. При цьому їх моделювання на основі теорії та методології ІММРД потребує враховувати часові зміни їх характеристик, як джерел електроенергії, згідно умов стаціонарності, квазістаціонарності, нестаціонарності та додаткових відмов під дією зовнішніх факторів. В першому випадку потужність джерела енергії має бінарну характеристику тобто 1 або 0 ($\mathcal{E} = \text{const}$). Джерела відновлювальної енергетики, при розрахунку оцінок емерджентності, коли вони є компонентами певної архітектури, характеризуються оцінкою $\mathcal{E} = \text{var}$, наприклад з кроком Δ ($\Delta_1, \Delta_2, \dots, 1$). Отже, така уточнена оцінка реальної емерджентності архітектури, при наявності відновлювальних джерел енергопостачання буде розраховуватись згідно виразу:
$$K_e = \frac{\sum^2}{\sum(1+3+4)} = \frac{\sum^2}{\sum 1 + \sum 3 + \sum 4}, \quad 1 = \text{var}, \quad 1(0 \div 1) (0.1, 0.2, \dots, 1).$$
 В якому у знаменнику

вказується відповідно зменшена оцінка реального стану відновлювального джерела, згідно неповної енергопотужності з кроком Δ , потужності від 0 до 1. У результаті емерджентність та енергонадійність модельованої архітектури, яка містить відновлювальні джерела електроенергії буде пропорційно зменшуватись.

У роботі [8] розроблене програмне забезпечення, на основі визначення характеристичного функціоналу стану об'єкта управління (ОУ), яке дозволяє побудувати динамічно-змінну образно-кластерну модель (ОКМ) при різних некритичних відхиленнях станів ОУ згідно різних ЛСІМ.

В умовах коли відбуваються раптові, особливо динамічні збурення енергосистеми, які приводять до розривів ЛЕП, пошкодження підстанцій, коротких замикань, раптових включень або відключень великої групи споживачів застосування такого програмного забезпечення і такого представлення ОКМ є неефективним. Тому при виникненні нештатних станів ЕС та переході її в квазістаціонарні стани зі зміною логістики та роботоздатності компонентів запропоновано

удосконалення характеристик структур ОКМ, які відображають три стани “норма”, “розвиток аварії”, “аварія” рис.7.



Рис. 7 - Кластерні моделі станів обладнання енергосистеми при раптових критичних їх відмовах.

За умови виникнення квазістаціонарних переходів під впливом зовнішніх факторів, типу функцій Дірака, необхідно щоб система з максимальною швидкістю без розрахунків характеристичного функціоналу на багатосекторному моніторі, де відображена архітектура відповідного рівня ЕМ, яку обслуговує оператор диспетчерського пункту, відображала поточний стан кожного об'єкта системи у вигляді трьох демонстраційних заставок “норма”, “розвиток аварії”, “аварія” рис. 8.

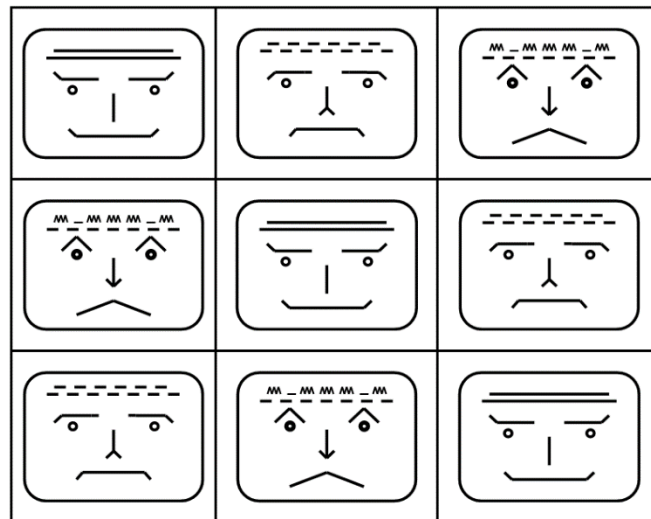


Рис. 8 – Багатосекторний монітор з відображеними поточними станами об'єктів системи

Запропонований метод удосконалення алгоритму застосування ОКМ в умовах катастрофічних впливів на ЕМ не потребує розробки складного програмного забезпечення, що підвищує надійність його застосування. Застосування ОКМ для моніторингу станів енергосистем в умовах катастрофічних відмов обладнання та компонентів, шляхом їх демонстрації на багатосекторному моніторі диспетчерського пункту, дозволяє збільшити швидкість реакції оператора на виникнення нештатних станів ЕС. Покращити можливості ідентифікації та попередження небезпечних передаварійних, аварійних ситуацій, попередити виникнення вибухо та екологічно небезпечних аварій на об'єктах.

Висновки. Зроблений підхід до застосування теорії, методології та оцінки емерджентності різних архітектур енергосистем на основі ІММРД та оцінки коефіцієнта емерджентності. Показано, що для визначення рівня деградації ЕС доцільно застосовувати ЛСІМ-5 на основі розрахунку матриці кореляційно-Хеммінгових та Евклідових відстаней між технологічними та структурними параметрами високовольтних мереж в умовах динаміки відмов обладнання.

Список бібліографічного опису

1. Пітух І.Р. Теорія та технологія побудови спеціалізованих інтерактивних систем // Спеціалізовані комп'ютерні технології в інформатиці / за загальною редакцією Я.М.Николайчука / І.Р. Пітух – Тернопіль: "Бескиди", 2017.- С 665-694.
2. Система автоматизованого проектування інтерактивного зв'язку оператора автоматизованого керування багатопараметричним об'єктом на основі моделі кластера образ / Ігор Пітух, Галина. Процюк, Василь. Процюк, Любов Миколайчук // Матеріали XIII міжнародної конференції «Перспективні технології та методи проектування MEMC»: MEMSTECH'2017.- С.18-21.

3. Пат.150887 Україна МПК (2022.01) H04B 10/00 H04B 10/112 (2013.01), Багатоканальний пристрій визначення хеммінгової віддалі сигналу між собою / Николайчук Я. М., Пітух І.Р., Грига В.М., Гринчишин Т.М., Угорчук В.В., Сидор А.І. № у 2021 05962; заявл. 23.10.2021; опубл. 05.05.2022 Бюл.№ 18.
4. Пітух І.Р. Метод та критерії оцінки емерджентності та характеристики архітектури інтерактивних розподілених комп'ютерних та кіберфізичних систем / Пітух І.Р. // Науковий збірник «Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології», (33), 2021.- С. 115-121.
5. Методологія статистичного опрацювання даних спостережувальних об'єктів заповідних територій / Пітух І.Р., Николайчук Я.М., Петрашук Я.В. // Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції «Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, моделювання та управління» (ISCM- 2022).-Надвірна, 2022р. – С.130-142.
6. Пітух І.Р. Матричні моделі розподілених архітектурних комп'ютерних систем та методологія побудови алгоритму діагностики руху даних центральним сервером // Научно-теоретический журнал "Искусственный интеллект".- Донецьк: НАН України, 2009.- №1.-С. 286-292.
7. Реймонда Ельмасрі та Шамканта Навітьхе Основи систем баз даних // Pearson Education, Inc. », 2021.- №1.-С. 1272.
8. Пат. 107039 Україна МПК G05B 23/00 (2016.01),G06F 11/277 (2006.01) Спосіб контролю параметрів технологічного процесу / Пітух І.Р., Возна Н.Я., Процюк Г.Я., Николайчук Я.М. №u201507057; заявл.15.04.2015; опубл. 25.05.2016, Бюл. №10/2016.

References

1. Pitukh I.R. Theory and technology of building specialized interactive systems // Specialized computer technologies in informatics / edited by Y.M. Nikolaychuk / I.R. Pitukh - Ternopil: "Beskydy", 2017. - P 665-694.
2. Computer-Aided Design System of the Interactive Communication of the Operator of Computer-Aided Control of Multiparameter Object Based on the Image-Cluster Model / Igor Pituh, Halyna. Protsiuk, Vasyl. Protsiuk, Lubov Nykolaychuk // Proceedings of the XIIIthe International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: MEMSTECH'2017.- PP.18-21
3. Pat. 150887 Ukraine IPC (2022.01) H04B 10/00 H04B 10/112 (2013.01), Multi-channel device for determining the Hamming distance between signals / Nikolaychuk Y. M., Pitukh I. R., Griga V. M., Grynychshyn T .M., Uhorchuk V.V., Sydor A.I. No. u 2021 05962; statement 23.10.2021; published 05/05/2022 Bull. No. 18.
4. Pitukh I.R. Method and criteria for assessing the emergentity and characteristics of the architectures of interactive distributed computer and cyber-physical systems / I.R. Pitukh. // Scientific collection "Physico-mathematical modeling and information technologies", (33), 2021. - P. 115-121.
5. Methodology of statistical data processing of observation objects of protected areas / Pitukh I.R., Nikolaychuk Y.M., Petraschuk Y.V. // Collection of materials of the problem-scientific interdisciplinary conference "Information problems of computer systems, jurisprudence, energy, modeling and management" (ISCM- 2022).-Nadvirna, 2022. - P.130-142.
6. Pitukh I.R. Matrix models of architectures of distributed computer systems and the methodology of building an algorithm for diagnosing the movement of data by a central server // Scientific-theoretical magazine "Iskustvennyj Intellect". - Donetsk: National Academy of Sciences of Ukraine, 2009. - №1.-S. 286-292.
7. Raymond Elmasri and Shamkant Navathe Fundamentals of Database Systems // Pearson Education, Inc. ", 2021.- No. 1.-S. 1272.
8. Pat. 107039 Ukraine IPC G05B 23/00 (2016.01), G06F 11/277 (2006.01) Method of control of technological process parameters / Pitukh I.R., Vozna N.Ya., Protsyuk G.Ya., Nikolaychuk Y.M. #u201507057; application 15.04.2015; published 05/25/2016, Bul. No. 10/2016.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-24>

УДК 621.391

Рощенко Олексій Миколайович, старший науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0002-3562-5428>

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, м. Київ, Україна

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕШКОД НА ЕЛЕКТРОННИЙ ПРИСТРІЙ

Рощенко О.М. Вплив електромагнітних перешкод на електронний пристрій. У статті розкрито вплив електромагнітних перешкод на електронний пристрій. Описано напрямки застосування супутникової системи навігації та наголошено на її важливості в умовах сьогодення. Охарактеризовано підхід до захисту від електромагнітних перешкод та випромінювання який наразі застосовується на базі медичної техніки та виробничої системи. Визначено підґрунття та напрямки розповсюдження імпульсного сигналу, його особливості та спектр дії. Окреслено складову імпульсного сигналу та частотну відстань. Так, у роботі зазначається, що вид імпульсної інтерференції, що розглядається є радіочастотним імпульсним сигналом, який, у свою чергу змодульований синусоїдальною несучою, математична модель якої наведена у часовій області дії. Математично обґрунтовано принцип визначення частотного спектру імпульсного сигналу, з наведеного опису відокремлено спектральну огинаючу імпульсного сигналу основної смуги. Наголошується, що імпульсні перешкоди мають той самий тип сигналу та форму спектру потужності, що й код визначення дальності супутникової системи навігації, що дозволяє зміщуватися сигналам в процесі демодуляції основної смуги, і, як наслідок, впливати на відповідну обробку навігаційних сигналів. Описано механізм визначення кінцевої вихідної потужності перешкод корелятора. Куди покладено як показник затримки передачі, частоти перешкод так і фазову похибку, що у сукупності дає точне значення вихідної потужності. У процесі математичного моделювання виявлено, що вплив імпульсних сигналів перешкод на навігаційні сигнали залежить від комбінації параметрів імпульсу, зсуву частоти перешкод і характеристик коду дальності. Також зазначається принцип накладення двійкової фазової маніпуляції. Сформовано графік результатів моделювання частоти бітових помилок під впливом імпульсних перешкод, який наочно доводить запропоновану математичну модель.

Ключові слова: екранування, захист, навігація, вплив, перешкода, імпульс, супутник, завада, електронний пристрій.

Roschenko O. The influence of electromagnetic interference on an electronic device. The article describes the impact of electromagnetic interference on an electronic device. The areas of application of the satellite navigation system are described and its importance in today's conditions is emphasized. The approach to protection against electromagnetic interference and radiation, which is currently used on the basis of medical equipment and production systems, is characterized. The basis and directions of propagation of the pulse signal, its features and spectrum of action are determined. The component of the pulse signal and the frequency distance are outlined. Thus, it is noted in the paper that the considered type of pulse interference is a radio frequency pulse signal, which, in turn, is modulated by a sinusoidal carrier, the mathematical model of which is given in the time domain. The principle of determining the frequency spectrum of an impulse signal is mathematically substantiated, and the spectral envelope of the impulse signal of the main band is separated from the given description. It is emphasized that pulse jammers have the same signal type and power spectrum shape as the ranging code of the satellite navigation system, which allows the signals to shift during the baseband demodulation process and, as a result, affect the corresponding processing of the navigation signals. The mechanism for determining the final output power of correlator interference is described. Where is the indicator of transmission delay, interference frequency and phase error, which together gives the exact value of the output power. In the process of mathematical modeling, it was found that the influence of pulse signals of obstacles on navigation signals depends on the combination of pulse parameters, the shift of the frequency of obstacles and the characteristics of the range code. The principle of superimposing binary phase manipulation is also noted. A graph of the results of the simulation of the frequency of bit errors under the influence of impulse interference has been created, which clearly proves the proposed mathematical model.

Key words: shielding, protection, navigation, influence, obstacle, impulse, satellite, interference, electronic device.

Вступ та постановка проблеми. Основи забезпечення військової безпеки країни вирішуються через широкий спектр завдань, таких як, будівництво, розвиток і застосування Збройних Сил України, супровід розробки, створення та аналіз результатів застосування сучасних систем озброєння, а також формування вимог до оборонних комплексів, що йдуть їм на зміну. Враховуючи ситуацію що склалася 24 лютого 2022 року, коли сусідня держава вчинила воєнний наступ актуальність даного дослідження набуває особливого значення.

В останні роки супутникова система навігації (GNSS), широко використовується у військовій, цивільній та комерційній сферах. Однак із зростанням розвитку електронного інформаційного обладнання електромагнітне середовище сповнене складних сигналів радіоперешкод. Коли радіочастотні перешкоди від частотного обладнання або космічного випромінювання потрапляють у робочу смугу частот приймача супутникової системи навігації, це серйозно впливає на продуктивність прийому та відстеження приймача, знижує точність позиціонування та навіть призводить до втрати супутникового відстеження. Саме тому дослідження

впливу електромагнітних перешкод на електронний пристрій у рамках навігаційної системи є особливо актуальним питанням.

Проблеми дієвого застосування навігаційної апаратури супутникової системи навігації в системах навігації та наведення озброєння та військової техніки виникають через низьку перешкодостійкість. Одним із факторів, що істотно впливають на точність навігаційної апаратури, є вплив електромагнітних полів.

Для ефективної протидії негативному впливу застосовують різноманітні методи захисту електронних приладів. Найбільш технічно простим способом вирішення проблеми електромагнітного випромінювання є заміна або виключення зі схеми приладів елементи яких чутливі до електромагнітних полів. У разі, коли такий варіант неможливий, доцільно вдаватися до методу, який дозволить або повністю запобігти, або послабити електромагнітну дію до такого рівня, при якому виключається виникнення помилок в обладнанні, що використовується. Таким методом є екранування. Ефективність екранування безпосередньо залежить від матеріалу та конструктивних особливостей корпусу екрана. Існує безліч матеріалів, які можуть бути застосовані в якості екрануючого засобу. Вся проблема полягає лише в тому, що всі ці матеріали максимально ефективні лише у певних, конкретних випадках. Якщо ж говорити про конструкцію екрана, то варто помітити, що найбільший вплив на ефективність екранування має форма екрана, товщина стінки та наявність щілин, отворів для елементів керування та кабелів, резонансних ефектів порожнин і т.д.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підхід наукової спільноти до розгляду рівня впливу електромагнітних перешкод на сучасні електронні пристрої визначається ґрунтовним обсягом робіт.

Викладений у [1] матеріал розкриває вплив перехресних завад на роботу електронного пристрою, проєктування якого необхідно виконати у рамках наукового завдання. Проаналізовано причини та механізм виникнення перехресних перешкод, які можуть порушити коректну роботу пристрою через зміну логічного рівня сигналу на провіднику-жертві внаслідок впливу на нього наведеної перехресної перешкоди.

Д. А. Іщенко, Д. Л. Федорчук, С. Д. Іщенко та Л. М. Маришук [2] запропонували підхід, згідно з яким дії високоточної зброї у процесі її наведення на об'єкти та відповідні заходи систем захисту, що вживаються на супротив. Науковці розглядають як антагоністичні, оскільки вони виконуються як з використанням передавальних і приймальних радіоелектронних засобів високоточної зброї, так і засобів радіоелектронної боротьби систем захисту. Застосування засобів радіоелектронної боротьби в операції в електромагнітному спектрі з метою протидії високоточній зброї досліджується як складова операції в електромагнітному спектрі.

Особливості розрахунку завадозахищеності радіозв'язку в умовах радіоподавлення запропонували В. П. Заславець, М. П. Долина, О. В. Чечуй [3]. Аналіз застосування сучасних засобів радіоелектронної боротьби свідчить про необхідність проведення розрахунків завадозахищеності ліній радіозв'язку при плануванні зв'язку та при забезпеченні управління військами (силами) в мирний, воєнний час та особливий період. Запропоновано застосування методики розрахунку завадозахищеності ліній радіозв'язку в умовах ведення радіоелектронного конфлікту.

У [4] систематизовано нормативні вимоги, що встановлені до стійкості приладів обліку електричної енергії від дії впливу на них радіочастотного електромагнітного випромінювання. Окреслено механізм впливу радіочастотного електромагнітного випромінювання та визначено конструктивні елементи приладів обліку, чутливі до дії такого випромінювання. Теоретично обґрунтовано застосування електромагнітного екранування як дієвого технічного засобу запобігання впливу електромагнітного поля у радіочастотному діапазоні на відповідність обліку електричної енергії. Запропоновано поділ конструктивного виконання приладів обліку електричної енергії на групи за ознаками захисту від впливу радіочастотного електромагнітного випромінювання.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Pan Yanfei, Dai Mayin, Zhao Hongwei, Hu Nianguang, Guo Qiang, Huang Jintian [5], Kuila Chinmoy, Maji Animesh, Murmu Naresh, Kuila Tapas, Srivastava Suneel [6], Jiang Lu, Xue Cun, Zhou You-He [7], Tiwari Alavya, Tiwari Arushi, Bhatia Arpit, Chadha Utkarsh, Kandregula Satvik, Selvaraj Senthil Kumaran, Bhardwaj Preetam [8], Ma Guilei, Man Menghua, Zhang Yongqiang, Liu Shanghe [9], M'barki Zakaria, Rhazi Senhaji, Mejdoub Youssef [10], Liu Yaowen, Qu Sudong [11], Wanasinghe Dimuthu, Aslani Farhad, Ma Guowei [12], Zhao Kaiyuan, Xiao Sa, Wu Xiangyu, Wang Yang, Cheng Xian [13], Liu Yan, Yu Kang, Chen Ruixun [14], Crovetti Paolo [15], Shi Chaofan, Wang Mengyuan, Zhang Xin, Shi Wangzhou, Shi Hui, Zhang Yi [16], Tiwari Arun,

Kumar Amit, Said Zafar [17], Singh Dr. Avanish, Mishra Monika, Ohlan Anil, Dhawan Sundeep [18] та інші.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за окресленою тематикою, питання впливу електромагнітних перешкод на електронний пристрій залишається відкритим та потребує детального опрацювання відносно новітніх стандартів технічного регулювання.

Постановка завдання. У рамках даної статті необхідно розкрити принципи впливу електромагнітних перешкод на електронний пристрій. Математично описати форму хвилі імпульсних перешкод і проаналізувати вплив імпульсних перешкод на продуктивність демодуляції навігаційного приймача.

Викладення основного матеріалу дослідження. Імпульсний сигнал перешкод відноситься до сигналу перешкод, який складається із серії вузьких імпульсів, що повторюються протягом періоду. Слід зазначити, що цей вид імпульсної інтерференції є радіочастотним імпульсним сигналом, модульованим синусоїдальною несучою, яка може бути змодельована у часовій області як:

$$I_{PUI}(t) = p(t)\sqrt{2J}\cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (1)$$

де J – потужність сигналу імпульсної перешкоди,

f_i – центральна частота несучої,

θ_i – початкова фаза,

$p(t)$ – імпульсний сигнал основної смуги.

Вираз прямокутного імпульсу у часовій області якого можна записати як:

$$p(t) = \begin{cases} A, mT_p \leq t \leq (m+D)T_p, m = \text{int} \\ 0, \text{інше,} \end{cases} \quad (2)$$

де A – амплітуда прямокутного сигналу,

T_p – період імпульсу

D – шпаруватість імпульсного сигналу відповідно.

Частота повторення $f_{PRF} = 1/T_p$.

Використовуючи перетворення Фур'є на формулі 2 знаходимо частотний спектр імпульсного сигналу:

$$p(f) = D \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}(k\pi D) \delta\left(f - \frac{m}{T_p}\right)$$

Це, зокрема, показує, що спектральна огинаюча імпульсного сигналу основної смуги є функцією sinc , яка складається з дискретних спектральних ліній з інтервалом $1/T_p$ а ширина смуги основного пелюстка спектральної лінії становить $1/(DT_p)$.

У сигналі супутникової системи навігації (GNSS – Global Navigation Satellite System) частотний спектр коду визначення дальності, який використовується для модуляції з розширеним спектром даних навігаційних повідомлень, також складається з дискретних спектральних ліній, а інтервал спектральних ліній становить $1/T_c$ ($T_c = 1$ мс, що є періодом коду ранжування). Імпульсні перешкоди мають той самий тип сигналу та форму спектру потужності, що й код визначення дальності GNSS. Певна подібність сигнальної системи дозволяє легко накладатися на навігаційні сигнали в процесі демодуляції основної смуги, тим самим впливаючи на відповідну обробку навігаційних сигналів.

У кореляційному процесорі імпульсний сигнал перешкоди множиться на локальний опорний код визначення діапазону, згенерований корелятором, а потім інтегратор виконує когерентну обробку інтегрування протягом часу T_d інтегрування. Кінцева вихідна потужність перешкод корелятора становить

$$P_{PUI} = k \left| \frac{1}{N_s} \sum_{n=0}^{N_s-1} \sqrt{2J} \sum_{z=1}^{\infty} p(nT_s - zT_p) \cdot c(nT_s - \tau_n) e^{j(2\pi\Delta f_i nT_s + \Delta\theta_i)} \right| \quad (4)$$

де $c(t)$ – локально згенерований опорний код розширення,

τ_n – затримка передачі,

Δf_i – частота перешкод,

$\Delta\theta_i$ – фазова похибка.

Формула (4) показує, що вплив імпульсних сигналів перешкод на навігаційні сигнали залежить від комбінації параметрів імпульсу, зсуву частоти перешкод і характеристик коду дальності.

Еквівалент $C/N_0 \in C/N_0$ на виході корелятора навігаційного приймача. За наявності перешкод вихідна потужність перешкод корелятора може бути еквівалентна приросту потужності шуму. У цей час еквівалент C/N_0 під дією імпульсних перешкод становить

$$[C/N_0]_{eq} = \frac{P_s}{P_N + P_{PUI}},$$

де P_s – потужність навігаційного сигналу на виході корелятора,

P_N – потужність шуму на виході корелятора.

Навігаційний сигнал модулюється двійковою фазовою маніпуляцією. Згідно з найкращою теорією виявлення приймача, частота бітових помилок системи під впливом імпульсних перешкод становить

$$P_e = (1 - D)Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) + DQ\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0 + N_J}}\right) \quad (6)$$

де N_0 – одностороння спектральна щільність потужності шуму,

E_b – потужність сигналу, що переноситься сигналом на біт ($E_b = P_s/R_s$),

N_J – спектральна щільність потужності імпульсної перешкоди,

R_s – швидкість коду розширення.

Підставляючи E_b у формулу (6), отримаємо:

$$P_e = (1 - D)Q\left(\sqrt{\frac{2[C/N_0]_{eq}}{N_0 R_s (P_N + P_{PUI})}}\right) + DQ\left(\sqrt{\frac{2[C/N_0]_{eq}}{(N_0 + N_J) R_s (P_N + P_{PUI})}}\right)$$

З формули (7) видно, що частота бітових помилок обернено пропорційна еквівалентному C/N_0 і прямо пропорційна робочому циклу. Припускаючи, що відношення сигнал/шум навігаційного сигналу становить 10 дБ, коли перешкоди не застосовуються, є можливість отримати результат моделювання частоти бітових помилок під впливом імпульсних перешкод, як показано на рисунку 1.

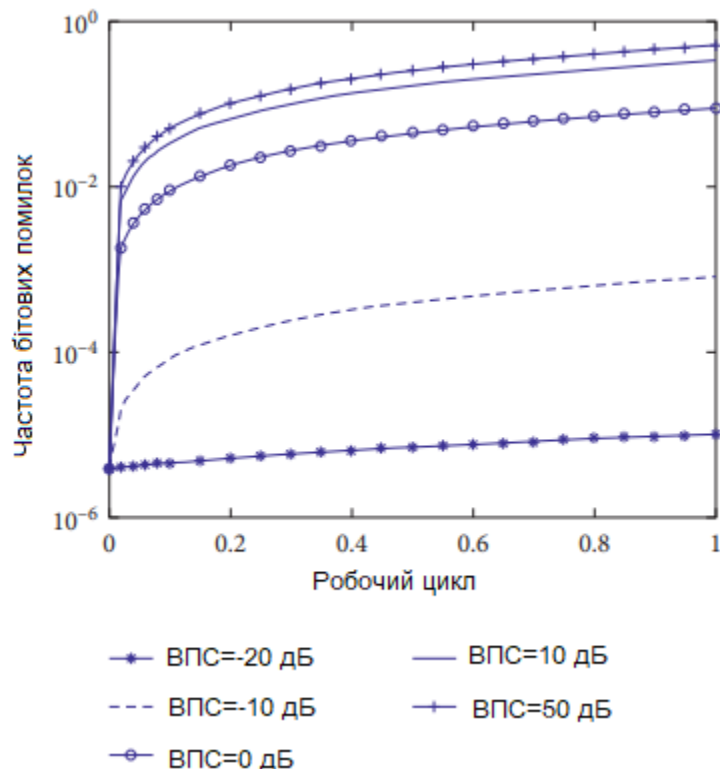


Рис.1 – Графік моделювання частоти бітових помилок під впливом імпульсних перешкод

З рисунка 1 видно, що зі збільшенням шпаруватості імпульсної перешкоди збільшується частота бітових помилок. Коли відношення перешкод до сигналу імпульсних перешкод становить - 20 дБ, частота бітових помилок є надзвичайно малою, і імпульсні перешкоди майже не впливають на навігаційну систему. З поступовим збільшенням відношення перешкод до сигналу відповідно зростає частота бітових помилок під час того самого циклу навантаження.

Коли відношення перешкод до сигналу > 10 дБ, збільшення відношення перешкод до сигналу мало впливає на подальше погіршення продуктивності навігаційної системи. Це показує, що потужність перешкод імпульсної перешкоди значною мірою визначає ефект перешкод, але коли потужність перешкод досягає певного порогу, частота бітових помилок системи має тенденцію залишатися незмінною зі збільшенням відношення перешкод до сигналу. На даний момент частота бітових помилок більше не є ефективним показником якості навігаційного приймача. Якщо продовжити збільшувати відношення перешкод до сигналу, імпульсні перешкоди матимуть серйозний вплив на канал збору та відстеження, що призводить до втрати замкнутого циклу та супутникового відстеження, що значно впливає на продуктивність навігаційної системи.

Висновки. У роботі досліджено вплив електромагнітних перешкод на електронний пристрій. Проаналізовано частотно-часові характеристики імпульсного сигналу перешкод, а також вплив на продуктивність згортання та демодуляції навігаційної системи.

Існування імпульсних перешкод призводить до збільшення частоти бітових помилок навігаційної системи, і дана частота пропорційна робочому циклу та потужності перешкод.

За умови, якщо частота сигналу перешкод становить > 1560 МГц, ефект ослаблення імпульсної перешкоди навігаційного сигналу значно сильніший, ніж у одно частотного імпульсного впливу. Пояснюється це тим, що імпульсна інтерференція та код вимірювання дальності мають подібні спектральні характеристики, які є кореляційною інтерференцією. Кілька дискретних спектральних ліній, що потрапляють у смугу інтегратора, можуть легко вплинути на згортання та демодуляцію навігаційного сигналу через корелятор, а менша потужність перешкод може досягти такого ж ефекту перешкод, як і одно частотний імпульсний вплив.

Перспективами подальшого дослідження є проектування екрануючого пристрою, дія якого буде максимально направлена на захист навігаційної системи від електромагнітного випромінювання.

Список бібліографічного опису

1. Леонов С. Дослідження впливу перехресних перешкод на роботу електронного пристрою / С. Леонов, Б. Клішчов // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2021. Т. 4 (66). С. 23-26. doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.4.023>.
2. Іщенко Д. А., Федорчук Д. Л., Іщенко С. Д., Маришук Л. М. Оцінювання ефективності застосування засобів радіоелектронної боротьби для протидії високоточній зброї як складової операції в електромагнітному спектрі // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем, 2023. № (23). С. 62–76. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.23.05>
3. Заславець В.П., Долина М.П., Чечуй О.В. Особливості розрахунку завадозахищеності ліній радіозв'язку в умовах радіоподавлення (радіоелектронного конфлікту). Системи озброєння і військова техніка. 2020. № 1(61). С. 7-12. <https://doi.org/10.30748/soivt.2020.61.01>.
4. Роголін С. В. Теоретичні основи експертних досліджень приладів обліку електричної енергії, що зазнали впливу радіочастотного електромагнітного випромінювання // Forensic Herald, Криміналістичний вісник, 2022. № 1 (37). С. 66-76.
5. Pan Yanfei, Dai Mayin, Zhao Hongwei, Hu Nianguang, Guo Qiang, Huang Jintian. Wood-Based Composites with High Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness and Ultra-Low Reflection. Coatings, 2022. №12. P.1117. doi:<https://doi.org/10.3390/coatings12081117>.
6. Kuila Chinmoy, Maji Animesh, Murmu Naresh, Kuila Tapas, Srivastava Suneel. Recent advancements in carbonaceous nanomaterials for multifunctional broadband electromagnetic interference shielding and wearable devices. Carbon, 2023. № 210. P. 118-175. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118075>.
7. Jiang Lu, Xue Cun, Zhou You-He. Sensitivity of the thermomagnetic instability in superconducting film to magnetic perturbation for electromagnetic interference detection. Superconductor Science and Technology. 2022. № 36. doi:<https://doi.org/10.1088/1361-6668/aca007>.
8. Tiwari Alavya, Tiwari Arushi, Bhatia Arpit, Chadha Utkarsh, Kandregula Satvik, Selvaraj Senthil Kumaran, Bhardwaj Preetam. Nanomaterials for Electromagnetic Interference Shielding Applications: A Review. Nano. 2022. № 17. doi:<https://doi.org/10.1142/S1793292022300018>.
9. Ma Guilei, Man Menghua, Zhang Yongqiang, Liu Shanghe. Electromagnetic Interference Effects of Continuous Waves on Memristors: A Simulation Study. Sensors. 2022. № 22. P. 57-85. doi:<https://doi.org/10.3390/s22155785>.
10. M'barki Zakaria, Rhazi Senhaji, Mejdoub Youssef. A novel fuzzy logic control for a zero current switching-based buck converter to mitigate conducted electromagnetic interference. International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2023. № 13. P. 1423-1436. doi:<https://doi.org/10.11591/ijece.v13i2.pp1423-1436>.

11. Liu Yaowen, Qu Sudong. Research on Electromagnetic Interference of Distributed Control Radar Servo System. 2022. doi:https://doi.org/10.1007/978-981-19-1309-9_151.
12. Wanasinghe Dimuthu, Aslani Farhad, Ma Guowei. Effect of Carbon Fibres on Electromagnetic-Interference-Shielding Properties of Geopolymer Composites. *Polymers*. 2022. № 14. P. 37-50. doi:<https://doi.org/10.3390/polym14183750>.
13. Zhao Kaiyuan, Xiao Sa, Wu Xiangyu, Wang Yang, Cheng Xian. Electromagnetic Signal Interference Based on Convolutional Autoencoder. 2023. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-031-23902-1_18.
14. Liu Yan, Yu Kang, Chen Ruixun. Electromagnetic Interference Posed by Wireless Devices Inside Airproof Cabin of Manned Spacecraft. 2023. doi:https://doi.org/10.1007/978-981-19-3387-5_37.
15. Crovetto Paolo. Electromagnetic Interference and Compatibility. 2021. doi:<https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-0501-5>.
16. Shi Chaofan, Wang Mengyuan, Zhang Xin, Shi Wangzhou, Shi Hui, Zhang Yi. Enhanced electromagnetic interference shielding performance of patterned AgNWs doped MXene films in X-band. *Physica Scripta*. 2023. doi:<https://doi.org/10.1088/1402-4896/acbd4c>.
17. Tiwari Arun, Kumar Amit, Said Zafar. Nanomaterials for electromagnetic interference shielding application. 2022. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90524-4.00035-9>.
18. Singh Dr. Avanish, Mishra Monika, Ohlan Anil, Dhawan Sundeep. Electromagnetic Interference Shielding and its Evaluation. 2022. doi:<https://doi.org/10.2174/9789815036428122010004>.

References

1. Leonov S. Study of the influence of crosstalk on the operation of an electronic device / S. Leonov, B. Klishchov // Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers. Poltava: PNTU, 2021. T. 4 (66). C. 23-26. doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.4.023>.
2. Ishchenko DA, Fedorchuk DL, Ishchenko SD, Marishchuk LM Evaluation of the effectiveness of the use of electronic warfare to counter high-precision weapons as a component of an operation in the electromagnetic spectrum // Problems of creation, testing, application and operation of complex information systems, 2023. № (23). C. 62-76. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.23.05>
3. Zaslavets V.P., Dolyna M.P., Chechui O.V. Features of calculating the interference immunity of radio communication lines in conditions of radio jamming (radio electronic conflict). *Weapons systems and military equipment*. 2020. № 1(61). C. 7-12. <https://doi.org/10.30748/sovt.2020.61.01>.
4. Rogalin S. V. Theoretical foundations of expert studies of electricity metering devices exposed to radio frequency electromagnetic radiation // *Forensic Herald, Criminalistics Bulletin*, 2022. № 1 (37). C. 66-76.
5. Pan Yanfei, Dai Mayin, Zhao Hongwei, Hu Nianguang, Guo Qiang, Huang Jintian. Wood-Based Composites with High Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness and Ultra-Low Reflection. *Coatings*, 2022. №12. P.1117. doi:<https://doi.org/10.3390/coatings12081117>.
6. Kuila Chinmoy, Maji Animesh, Murmu Naresh, Kuila Tapas, Srivastava Suneel. Recent advancements in carbonaceous nanomaterials for multifunctional broadband electromagnetic interference shielding and wearable devices. *Carbon*, 2023. № 210. P. 118-175. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118075>.
7. Jiang Lu, Xue Cun, Zhou You-He. Sensitivity of the thermomagnetic instability in superconducting film to magnetic perturbation for electromagnetic interference detection. *Superconductor Science and Technology*. 2022. № 36. doi:<https://doi.org/10.1088/1361-6668/aca07>.
8. Tiwari Alavya, Tiwari Arushi, Bhatia Arpit, Chadha Utkarsh, Kandregula Satvik, Selvaraj Senthil Kumaran, Bhardwaj Preetam. Nanomaterials for Electromagnetic Interference Shielding Applications: A Review. *Nano*. 2022. № 17. doi:<https://doi.org/10.1142/S1793292022300018>.
9. Ma Guilei, Man Menghua, Zhang Yongqiang, Liu Shanghe. Electromagnetic Interference Effects of Continuous Waves on Memristors: A Simulation Study. *Sensors*. 2022. № 22. P. 57-85. doi:<https://doi.org/10.3390/s22155785>.
10. M'barki Zakaria, Rhazi Senhaji, Mejdoub Youssef. A novel fuzzy logic control for a zero current switching-based buck converter to mitigate conducted electromagnetic interference. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2023. № 13. P. 1423-1436. doi:<https://doi.org/10.11591/ijece.v13i2.pp1423-1436>.
11. Liu Yaowen, Qu Sudong. Research on Electromagnetic Interference of Distributed Control Radar Servo System. 2022. doi:https://doi.org/10.1007/978-981-19-1309-9_151.
12. Wanasinghe Dimuthu, Aslani Farhad, Ma Guowei. Effect of Carbon Fibres on Electromagnetic-Interference-Shielding Properties of Geopolymer Composites. *Polymers*. 2022. № 14. P. 37-50. doi:<https://doi.org/10.3390/polym14183750>.
13. Zhao Kaiyuan, Xiao Sa, Wu Xiangyu, Wang Yang, Cheng Xian. Electromagnetic Signal Interference Based on Convolutional Autoencoder. 2023. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-031-23902-1_18.
14. Liu Yan, Yu Kang, Chen Ruixun. Electromagnetic Interference Posed by Wireless Devices Inside Airproof Cabin of Manned Spacecraft. 2023. doi:https://doi.org/10.1007/978-981-19-3387-5_37.
15. Crovetto Paolo. Electromagnetic Interference and Compatibility. 2021. doi:<https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-0501-5>.
16. Shi Chaofan, Wang Mengyuan, Zhang Xin, Shi Wangzhou, Shi Hui, Zhang Yi. Enhanced electromagnetic interference shielding performance of patterned AgNWs doped MXene films in X-band. *Physica Scripta*. 2023. doi:<https://doi.org/10.1088/1402-4896/acbd4c>.
17. Tiwari Arun, Kumar Amit, Said Zafar. Nanomaterials for electromagnetic interference shielding application. 2022. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90524-4.00035-9>.
18. Singh Dr. Avanish, Mishra Monika, Ohlan Anil, Dhawan Sundeep. Electromagnetic Interference Shielding and its Evaluation. 2022. doi:<https://doi.org/10.2174/9789815036428122010004>.

CONTENTS

AUTOMATION AND MANAGEMENT	
Dubuk V., Kovivchak Ya., Pavlyk Yu. Development of automated dairy logistics management system	5
Shtokalo D., Pasternak I., Pasternak O. Development of a controlled manipulator for remote control of an aircraft	18
INFORMATICS AND COMPUTER SCIENCE	
Baranchuk S., Bortnyk K. Automated trading system on cryptocurrency exchanges based on Node.js and React library	25
Bahniuk N., Bortnyk K., Lavrenchuk S., Domaratskyi I. The principle of operation of cross-platform applications with large volumes of data using the Redux library	32
Hulivata I.O., Nikolina I.I. Digital tools for the introduction to a barrier-free educational environment	37
Kardashuk V., Bortnyk K., Bahniuk N. Methods for improving the testing of digital systems	43
Lukianiuk S. The issue of cloud-based electronic document circulation in the performance of research works	52
Melnyk V., Bahniuk N., Bortnyk K., Linchuk O. System for web-resource monitoring by means of Elasticsearch	59
Melnyk K., Bahniuk N., Lavrenchuk S., Khrystynets N., Boba R., Omelchuk D. Application of machine learning methods for face recognition	73
Pronina O., Reshetnykov A. Formation of neural networks for solving the problem of linear classification	79
Rozlomii I., Kosenyuk H., Naumenko S. Vector's method of information encryption based on the author's template	87
Tomashko A. Principles of modeling the logistics complex system using machine learning	94

Fil N., Kudyrko O. Method of assessing the quality of a website	101
Khrystynets N., Lavrenchuk S., Pekh P., Yevsyuk M., Yevsyuk V., Krulik Yu. Functional adaptive interfaces with dynamic components for multimedia content storage subsystems	111
Tchaikovsky S. Regarding the issue of accreditation of calibration and measurement laboratories: general aspect	116
Yamkovoï M. Mathematical modeling of the supply chain for freight transportation within the logistics system	123
TELECOMMUNICATIONS AND RADIO ENGINEERING	
Bieliakov R., Fesenko O. Mobility model of a special purpose terrestrial communication network	130
Vasylkivskyi M., Boldyreva O., Vargatyuk H., Grabchak N. Adjusting the parameters of mobile MIMO systems using artificial intelligence	139
Vasylkivskyi M., Nikitovych D., Boldyreva O., Yakubivska N. Intelligent technologies for adjusting the physical layer of mobile networks	148
Zherebets O. Comparative analysis of different versions of bluetooth: advantages, disadvantages	161
Obukhova K. Secure remote connection to IP cameras via the Internet	168
Ozerchuk I. Bluetooth Low Energy, as the basis of data transmission with ultra-low energy consumption	174
Pituh I., Sydor A., Krulikovskiy B. Study of the characteristics of electricity transmission in high-voltage network architectures under the conditions of dynamic influences of external factors	181
Roschenko O. The influence of electromagnetic interference on an electronic device	188

ВИМОГИ ДО СТРУКТУРИ ТА ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛУ СТАТЕЙ

➤ Наукова стаття обов'язково повинна мати наступні необхідні елементи:

- 1) **постановка проблеми** у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями;
 - 2) **аналіз останніх досліджень і публікацій**, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор,
 - 3) **виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми**, котрим присвячується означена стаття;
 - 4) **формулювання мети дослідження** (постановка завдання);
 - 5) **виклад основного матеріалу дослідження** з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів;
 - 6) **висновки** з даного дослідження, у тому числі з науковою новизною;
 - 7) **перспективи подальших досліджень** у даному напрямку.
- Статтю можна подавати українською або англійською мовами. Вона повинна бути набрана у текстовому редакторі MS WORD. **Нумерацію сторінок** не виконувати. **Обсяг статті** 5 повних сторінок і більше (рекомендовано 5-12 ст.).
- **Параметри сторінки.** Верхнє, нижнє та праве поле – 1,5 см, лівє – 2 см. Від краю до верхнього колонтитула – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.
- **Шапка статті.** УДК, ORCID (у форматі <http://orcid...>), автори (ім'я та прізвище повністю), місце роботи кожного автора. Назва організації та назва статті набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом та вирівнюються по лівому краю. Назва статті розміщується через один рядок нижче назви організації (розмір шрифту 11 пт з напівжирним виділенням та вирівнюванням по центру).
- **Анотації** (українською та англійською мовами) повинні містити прізвища та ініціали авторів, назву статті та короткий її зміст і розміщуються через один рядок нижче назви статті та набираються з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 9 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині, 200 слів. Нижче анотацій обов'язково вказуються **ключові слова**.
- **Основний текст** розміщується на черз один рядок нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом та вирівнюється по ширині.
- **Формули** набираються у редакторі формул MS WORD (використовувати шрифти: Symbol, Time New Roman Cyr; розміри шрифтів: звичайний 12 пт, крупний індекс 7 пт, дрібний індекс 5 пт, крупний символ 18 пт, дрібний символ 12 пт). Формула вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка.
- **Ілюстрації**, що присутні у статті, необхідно розташовувати у тексті по центру, вирівнюючи підписи по центру (Рис. 1. Назва). Другий екземпляр ілюстрації необхідно подати на окремому листі. Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.
- **Таблиці** потрібно розташовувати у тексті по центру, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею ставиться її порядковий номер і назва (Таблиця 1. Назва) та вирівнюється по центру.
- **Посилання** на ту чи іншу роботу повинні позначатися в тексті у квадратних дужках за порядковим номером у списку літератури в кінці статті; посилання на джерела статистичних даних обов'язкові; посилання на публікації дослідників обов'язкові; посилання на підручники, навчальні посібники, газети і ненаукові журнали – небажані; посилання на власні публікації допускаються тільки у випадку крайньої необхідності; роботи авторів, на прізвища яких є посилання в тексті, мають бути в списку літератури до цієї статті.
- **Список бібліографічного опису та References.** Список літератури («References») потрібно приводити повністю окремим блоком, повторюючи список літератури, який подається українською / російською мовою, незалежно від того, є в ньому іноземні джерела чи ні. Тобто, після статті подається 2 списки: «Список бібліографічного опису» (звичайний список літератури) і «References» (список для міжнародних БД). Необхідно в опис джерела вносити всіх авторів, не скорочуючи їх до трьох, як це рекомендовано діючими у нас державними стандартами. References - повинен бути укладений англійською мовою або транслітерований. Оформлювати згідно з одним із найбільш уживаних у світі стандартів: APA – American Psychological Association; CBE – Council of Biology Editors, CitationSequence; Chicago (Author-Date System); Harvard; Harvard – British Standard; MLA (Modern Language Association) – Single Spaced Reference List; NLM – National Library of Medicine; Uniform Requirements for Manuscripts Submitted to Biomedical Journals. У жодному з перелічених стандартів не використовуються розділові знаки: «//», «–». Назва джерела та вихідні дані відокремлюються від авторів і заголовка статті типом шрифту, найчастіше, курсивом (*italics*), крапкою або комою. Існує багато безкоштовних програм для створення бібліографічних описів у романській абетці, що дають можливість автоматично створювати посилання за одним із світових стандартів наприклад: <http://www.easybib.com/>, <http://www.bibme.org/>, <http://www.sourceaid.com/>, <https://vak.in.ua/>.
- Вкінці статті вказується напрямок публікації відповідно до спеціальностей наукового журналу.
- Стаття обов'язково переслається електронною поштою за адресою: cit@lntu.edu.ua.
- Рукописи, що не відповідають вище вказаним вимогам, не розглядаються і до друку не приймаються.
- **Усі рукописи проходять перевірку на плагіат!**

ЗРАЗОК

УДК 621.391

Мороз Борис Іванович, д.т.н., професор,

<https://orcid.org/0000-0002-5625-0864>

Антіпов Олександр Андрійович, аспірант,

Журавльов Володимир Сергійович, аспірант.

<https://orcid.org/0000-0002-7366-9552>

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ДОСТАВКИ МЕДИКАМЕНТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ (МУЛЬТИКОПТЕРІВ) ЗА ЗАПИТОМ СПОЖИВАЧА

Times New Roman 9

Мороз Б. І., Антіпов О.А., Журавльов В. С. Автоматизована система доставки медикаментів за допомогою безпілотних літальних апаратів (мультикоптерів) за запитом споживача. Представлено концепт системи доставки медикаментів за допомогою безпілотних літальних апаратів. Запропоновано архітектуру системи автоматичної диспетчеризації замовлень від споживача, зберігання замовлень, та планування доставки дронами. Також було розглянуто юридичні обмеження роботи запропонованої системи.

Ключові слова: мультикоптер, дрон, доставка, клієнт-серверна архітектура, RSA, APM, HTTPS, Mission Planner.

Moroz B., Antipov A., Zhuravlev V. Automated system for the delivery of medical supplies using unmanned aerial vehicles (multicopter) at the request of the consumer. The concept of medical supplies delivery system using unmanned aerial vehicles is presented. The architecture of the system of automatic dispatching orders from the consumer, storage of orders, and scheduling delivery by drones are proposed. The legal limitations of the proposed system were also considered.

Keywords: multicopter, drone, delivery, client-server architecture, RSA, APM, HTTPS, Mission Planner.

Постановка наукової проблеми.

Times New Roman 11

Аналіз досліджень.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

Times New Roman 9

Список бібліографічного опису

1. Сін Лю, Цінъян Сяо, Віджай Гопалакришнан, Маттео Варвелло (2017) Дослідження 360 ° Інновації для панорамного відеопотоку, С. 50-55. ACM.
2. Б. Хань, Ф., Цянь, Л. Джі та В. Гопалакришнан. (2017) MP-DASH: Адаптивна відео-трансляція через перевагу, орієнтовану на багатфункціональність. У матеріалах 12-ї Міжнародної конференції з нових мережевих експериментів та технологій, С. 129–143. ACM.

References

1. Xing Liu, Qingyang Xiao, Vijay Gopalakrishnan, Matteo Varvello (2017) Research 360° Innovations for Panoramic Video Streaming, P. 50-55. ACM.
2. Han, B., Qian, F., Ji, L. & Gopalakrishnan, V. (2017) MP-DASH: Adaptive Video Streaming Over Preference-Aware Multipath. In Proceedings of the 12th International on Conference on emerging Networking Experiments and Technologies,

Стаття надійшла 14.05.2019 р.

Довідки з питань публікації та прийому матеріалів у науковий журнал «Комп'ютерноінтегровані технології: освіта, наука, виробництво» можна отримати у відповідального секретаря – к.т.н. Христинець Наталії Анатоліївни за тел. (0332) 74-61-15.

Адреса: 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75, ауд. 141

Автор статті отримує електронний примірник збірника. Вартість однієї сторінки становить **40 – грн. (для працівників Луцького НТУ), 50 грн – для інших ЗВО.**

Окремо, кожній статті, буде присвоєний **DOI (digital object identifier)** - ідентифікатор цифрового об'єкту, що веде за собою додаткову оплату **60 грн.**

Кошти можна перерахувати на рахунок:

Луцький національний технічний університет
43018 м.Луцьк, вул.Львівська, 75
р/р **UA86 820172 0 3132 4 1 002 2 02 017820**

З призначенням платежу: РВВ ЛНТУ. «За інформаційно-аналітичне забезпечення видання «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво» від _____ (ПБ)»

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

Колектив авторів

**КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ:
ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО**

Науковий журнал

Підп. до друку 15.06.2023. Формат А4. Папір офс.
Гарн. Таймс. Ум. друк. арк. 15.25 Обл. – вид. арк. 15.75
Тираж 20 прим. Зам. № 14/22

Комп'ютерний набір та верстка:

Н.А. Христинець

Друк Відділ іміджу та промоції ЛНТУ
Свідоцтво Держкомтелерадіо України ДК №4123 від 28.07.2011 р.
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75, тел.: (0332) 74-61-02
e-mail: rvv_lntu@ukr.net