

*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.

№52 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. Чернящук 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

№52 2023р.

Журнал засновано у грудні 2010 р.
Свідоцтво про реєстрацію KB № 16705–5277 Р.
Засновник: Луцький національний технічний університет
Рекомендовано до друку Науково-технічною радою
Луцького національного технічного університету
(протокол №1 засідання від 13.09.2023р.)
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	
Каган І.В., Костючко С.М. CRM-системи як інструмент підвищення ефективності бізнесу	5
Лавров Є.А., Чибіряк Я. І., Сірик О. Є., Великодний Д. В., Боровик В. О. Підхід до побудови автоматизованих систем експертного оцінювання для підтримки прийняття стратегічних і тактичних рішень	10
Роман В.І., Ілючок В.О. Комп'ютерна програма для проектування багатоканальних ультразвукових витратомірів	24
Чибіряк Я. І., Захарова А. М., Лавров Є. А., Великодний Д. В., Боровик В. О. Моделі для автоматизованого пошуку раціональних варіантів компонування виробів машинобудування	32
ІНФОРМАТИКА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА	
Думова Н. Dynamic Operator Extraction Method	43
Kaliuta К. Personalizing the user experience in Salesforce using AI technologies	48
Krulikovskyi В., Nazaruk V., Reinska V. Development of the mathematical apparatus of Boolean derivatives to improve the reliability and validity of information processing	54
Григор'єв Ю.О. Екстремальна задача для оператора з двома ядрами у просторах узагальнених функцій	60
Гусак Л.П., Левчук О.В., Гринчук Т.П. Значення комп'ютерної математики у формуванні цифрових компетентностей майбутніх економістів	71
Іваненко А.Р., Марченко О.І. Метод компіляції типів об'єднання мови TypeScript у проміжну мову CIL платформи .NET	77
Павленко А.В., Костючко С.М. Виявлення та аналіз найвразливіших місць веб-ресурсів	85

Поліщук М.М., Семенюк О. В., Поліщук Л.О., Ломакін М.В. Можливості авторизації та захисту даних користувача під час розробки хмарних веб-додатків для IoT	94
Прозур В.О. Аналіз видів генеративних змагальних мереж	104
Скілков Н.В. Дослідження часових характеристик підзадач в багатопроцесорних системах реального часу	111
Ярошенко О.С. Метод аналізу емоційного забарвлення текстів за допомогою графових згорткових нейронних мереж	119
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА	
Васильківський М.В., Прикмета А.В., Олійник А.О., Ксьондз Н.В. Оптимізація програмно-конфігурованих літаючих мереж доступу	128
Лишук В.В., Мороз С.А., Погинець А.Я., Кмитко Н.О., Барташук Р.І. Математична модель інвертора перетворювача частоти	140
Павленко А.В. Амплітудно-частотна характеристика та ефективність системи селекції рухомих цілей: аналіз та моделювання	146

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-01>

УДК: 004.58

Каган Іван Володимирович, магістр

Костючко Сергій Миколайович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-1262-6268>

Луцький національний технічний університет, м.Луцьк, Україна

CRM-СИСТЕМИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БІЗНЕСУ

Каган І.В., Костючко С.М. CRM-системи як інструмент підвищення ефективності бізнесу. У сучасному світі ефективне управління бізнесом та підвищення конкурентоспроможності компаній стають дедалі більшими завданнями. Для досягнення цих цілей необхідно постійно підвищувати ефективність управлінської діяльності, контролювати та аналізувати всі бізнес-процеси. У цьому контексті використання спеціалізованого CRM-програмного забезпечення стає надзвичайно важливим інструментом. CRM (Customer Relationship Management) системи дозволяють компаніям підвищити ефективність управління взаємовідносинами з клієнтами. Вони допомагають зберігати та аналізувати дані про клієнтів, автоматизувати процеси обробки замовлень, ведення обліку та звітності. Такий підхід дозволяє компаніям оперативно реагувати на поточні проблеми, швидко вирішувати запити клієнтів та підвищувати задоволеність клієнтів.

Ключові слова: CRM-системи, управління клієнтськими відносинами, ефективність бізнесу, програмне забезпечення, автоматизація бізнес-процесів.

Kahan I., Kostiuchko S. CRM systems as a tool for improving business efficiency. In today's world, effective business management and increasing the competitiveness of companies are becoming increasingly important tasks. To achieve these goals, it is necessary to constantly improve the efficiency of management activities, control and analyze all business processes. In this context, the use of specialized CRM software becomes an extremely important tool. CRM (Customer Relationship Management) systems allow companies to increase the efficiency of customer relationship management. They help to store and analyze customer data, automate order processing, accounting, and reporting. This approach allows companies to respond quickly to current problems, resolve customer requests quickly, and increase customer satisfaction.

Key words: CRM systems, customer relationship management, business efficiency, software, business process automation.

Постановка проблеми. У сучасному бізнес-середовищі компанії стикаються зі зростаючою конкуренцією та швидкими змінами потреб клієнтів. Щоб досягти успіху і стабільно розвиватися на ринку, ви повинні бути гнучкими, оперативно реагувати і завжди бути готовими до нових викликів. Система управління взаємовідносинами з клієнтами (CRM) є одним з найважливіших інструментів, який допомагає компаніям досягти цих цілей.

Сьогодні, щоб максимально ефективно контролювати діяльність компанії, підвищувати конкурентоспроможність і досягати поставлених цілей і максимальних результатів, необхідно постійно підвищувати ефективність управлінської діяльності, відстежувати і аналізувати всі етапи ведення бізнесу. Потрібен зважений підхід до проектування систем маркетингу і продажів для виробничих компаній, зі збалансованим набором ефективних інструментів. Використання спеціалізованого програмного забезпечення та автоматизація бізнес-процесів дозволяють компаніям швидко знаходити рішення поточних проблем.

Викладення основного матеріалу. Численні компанії почали використовувати спеціалізовані програми CRM для ефективного управління своєю клієнтською базою, що складається з клієнтів, постачальників, підрядників та інших важливих зацікавлених сторін. Основною метою впровадження цих систем CRM є вдосконалення та оптимізація управління взаємовідносинами з клієнтами, що зрештою призведе до підвищення прибутковості, залучення нових клієнтів і підвищення рівня задоволеності клієнтів [1].

Процес управління взаємовідносинами з клієнтами можна концептуалізувати як динамічний технологічний цикл, який здійснює контроль над функціями маркетингу, продажів і обслуговування. Ці етапи складно взаємопов'язані і взаємообумовлені. Давайте заглибимося в цей цикл:

- Управління маркетингом: на початку ефективного управління маркетингом закладає основу для всього циклу. Він передбачає стратегії розуміння потреб клієнтів, сегментування ринків і створення переконливих ціннісних пропозицій. На цьому етапі компанії визначають сфери своєї діяльності в управлінні продажами та обслуговуванням.

- Управління продажами: після того, як маркетингові зусилля виявили потенційних клієнтів, етап управління продажами займає центральне місце. Це включає в себе перетворення

потенційних клієнтів на клієнтів шляхом застосування індивідуальних стратегій продажів. Відомості, отримані в результаті маркетингових зусиль, керують відділом продажів у їхньому підході.

- Управління обслуговуванням клієнтів. Останньою частиною головоломки є управління обслуговуванням клієнтів, яке відіграє ключову роль у зміцненні лояльності клієнтів і зміцненні позитивного іміджу компанії. Відмінне обслуговування клієнтів не тільки задовольняє існуючих клієнтів, але й сприяє їх постійній підтримці.

Кінцевою метою використання системи CRM є оптимізація та вдосконалення управління відносинами з клієнтами, що сприяє підвищенню прибутковості, залученню нових клієнтів і підвищенню загального рівня задоволеності. Цей заплутаний танець управління взаємовідносинами з клієнтами можна візуалізувати як безперервний цикл, де маркетинг, продажі та сервісні функції є ключовими гравцями. Синергія між цими етапами дозволяє компаніям організувати комплексний, орієнтований на клієнта підхід до управління організацією [2].

Завдяки об'єднанню цих функцій у послідовну структуру підприємства можуть ефективно керувати різними етапами циклу взаємодії з клієнтами: маркетинг, продажі та обслуговування. Цей цілісний підхід до управління взаємовідносинами з клієнтами спрямований на розуміння та задоволення потреб клієнтів, зрештою залучаючи та утримуючи клієнтів завдяки найвищій якості обслуговування. Ця філософія, орієнтована на клієнта, є наріжним каменем успіху в сучасному конкурентному бізнес-середовищі.

Система CRM охоплює набір фундаментальних принципів і методів, які є інструментальними у формуванні клієнтоорієнтованого підходу компанії та сприянні успіху бізнесу. Ці основні принципи та методи включають:

- Орієнтація на клієнта: в основі CRM лежить фундаментальне переконання, що процвітання бізнесу залежить від його здатності задовольняти потреби та очікування клієнтів, що постійно змінюються. Системи CRM сприяють цьому, надаючи інформацію, яка поглиблює наше розуміння клієнтів, їхніх уподобань і поведінки. Ці знання служать основою для створення персоналізованих клієнтів і послуг.

- Інтеграція даних: CRM-системи вправно збирають і агрегують дані клієнтів із різних джерел, таких як бази даних, соціальні мережі, електронні листи тощо. Завдяки плавній інтеграції цієї інформації компанії можуть створювати повні профілі клієнтів. Ця інтеграція даних дозволяє організаціям організувати значущу взаємодію з клієнтами через різні точки взаємодії.

- Аналіз і звітність: системи CRM дають можливість компаніям заглиблюватися в багатство даних про клієнтів, дозволяючи глибоко аналізувати поведінку клієнтів, сегментацію та ефективність маркетингових і продажних ініціатив. Ця інформація є безцінною для визначення того, які стратегії дають оптимальні результати та дозволяють своєчасно коригувати для підвищення ефективності.

- Автоматизація процесів: автоматизація лежить в основі систем CRM, оптимізуючи щоденні операційні процеси та взаємодію з клієнтами. Ця автоматизація охоплює такі завдання, як продажі, маркетингові кампанії, обслуговування клієнтів, керування контактами та відстеження дзвінків. Автоматизуючи ці функції, компанії можуть підвищити ефективність, заощадити час і ресурси, одночасно забезпечуючи точність і компетентність у взаємодії з клієнтами.

- Інформаційне сховище та управління: системи CRM служать добре організованим репозиторієм для зберігання та керування даними клієнтів. Це сховище містить таку важливу інформацію, як контактні дані, історія взаємодії, попередні замовлення, запити та персоналізовані пропозиції. Доступ до цього сховища надає співробітникам компанії знання, необхідні для розуміння ситуації та надання індивідуального обслуговування клієнтам.

- Узгодження стратегії CRM. Впровадження системи CRM вимагає формулювання комплексної стратегії взаємовідносин із клієнтами, яка відповідає головним цілям і цінностям компанії. Це передбачає визначення цільових груп споживачів, створення сегментів клієнтів, формулювання стратегій персоналізації та розробку схем продажів і маркетингу. Система CRM служить засобом для ефективного виконання цієї стратегії.

- Навчання та розвиток співробітників: успішна інтеграція системи CRM залежить від навчання та розвитку співробітників. Це включає в себе інструкції з використання функцій CRM, розуміння принципів взаємодії з клієнтами та опанування мистецтва аналізу даних для покращення відносин із клієнтами. Компанії повинні інвестувати в розвиток навичок своїх співробітників, щоб забезпечити ефективне використання системи CRM і отримати максимальну вигоду для бізнесу.

Застосовуючи ці принципи та методи, підприємства можуть використовувати весь потенціал систем CRM для розвитку тривалих відносин із клієнтами, стимулювання зростання та підтримки конкурентної переваги на динамічному ринку.

Основою CRM-системи є ідея автоматизації збору та обробки інформації про клієнтів, постачальників та інших контрагентів, а також внутрішніх та зовнішніх процесів компанії. CRM, або управління взаємовідносинами з клієнтами, це програмне забезпечення та технологія, спрямована на побудову стабільного бізнесу [3].

Система CRM працює відповідно до набору фундаментальних принципів, які керують тим, як персонал компанії взаємодіє з програмним рішенням. Базові принципи CRM-системи наведені в Таблиці 1.

Таблиця 1 – Базові принципи системи CRM

Принцип	Опис
Доступність інформації для всіх	У сучасному взаємопов'язаному бізнес-ландшафті забезпечення доступності інформації, пов'язаної з клієнтами, має першочергове значення. Централізоване сховище служить резервуаром для широкого спектру взаємодій з клієнтами, починаючи від доречних фактів і закінчуючи контактними даними. Ці доступні дані є цінним активом, що дозволяє всім співробітникам компанії отримувати важливу інформацію. Завдяки цьому він не тільки запобігає втраті даних, але й сприяє єдиному підходу до взаємодії з клієнтами.
Централізований центр управління каналами	Створення єдиного центру для управління каналами взаємодії з клієнтами оптимізує роботу та оптимізує використання часу спеціалістів. Цей централізований хаб сприяє створенню точних і об'єктивних оцінок ефективності різних каналів взаємодії з клієнтами. Крім того, це відкриває шлях для скоординованої комунікації по всіх каналах, забезпечуючи послідовний і злагоджений підхід до залучення клієнтів.
Систематичний аналіз потоку	Безперервний приплив даних вимагає систематичного підходу до аналізу. Важливо регулярно аналізувати доступну інформацію про клієнтів і готувати її для прийняття обґрунтованих рішень. Систематичний аналіз вхідних даних дозволяє компанії не тільки бути в курсі тенденцій клієнтів, але й дає змогу приймати рішення на основі даних. Цей стратегічний процес є основою для вдосконалення стратегій компанії та забезпечення прийняття рішень на основі даних.

Ці принципи відіграють ключову роль у вдосконаленні управління відносинами з клієнтами. Завдяки сприянню доступності інформації, централізації управління каналами та впровадженню систематичного аналізу даних компанії можуть налагодити міцніші зв'язки зі своїми клієнтами, що призведе до вдосконалення стратегій, прийняття більш обґрунтованих рішень і, зрештою, до успіху в бізнесі.

Ця система включає в себе інформацію про клієнтів, їх історію взаємодії, профілі, історію покупок, а також дані про організацію, її структуру продажів та поточний стан бізнесу. Вихідні дані включають агреговану інформацію та показники, які використовуються для оптимізації роботи компанії та її співробітників.

CRM-системи особливо корисні для великих компаній з великим обсягом клієнтів, оскільки вони дозволяють інтегрувати маркетингову стратегію, продажі та обслуговування, використовуючи всі доступні канали зв'язку та бази даних [4].

Основними елементами, що визначають дію CRM-системи, є:

- Збір та збереження інформації про клієнтів та контрагентів.
- Автоматизація процесів усередині компанії.

- Моніторинг та керування потоком угод та продажів.
- Планування та нагадування про дзвінки та зустрічі з клієнтами.
- Система задач та контролю роботи співробітників.

Крім того, CRM-системи можуть допомогти вирішити такі завдання:

- Оптимізація робочих процесів та зниження витрат.
- Підвищення лояльності клієнтів та задоволення їх потреб.
- Створення зручних та ефективних інструментів для комунікації з клієнтами.

Наявність загального доступу до інформації в CRM-системі є важливим аспектом її функціонування. Це дозволяє вищому менеджменту контролювати роботу співробітників, відстежувати статус угод та складати робочі плани та прогнози. Крім того, ця система допомагає уникнути втрати історії взаємодії з клієнтами при звільненні співробітника [5].

Етапи процесу управління CRM-системою наведено на Рисунку 1.



Рисунок 1 – Процес управління CRM-системою

Головне завдання CRM-системи - підвищення лояльності клієнтів до бренду під час взаємодії зі співробітниками. Вона дозволяє спростити та систематизувати бази даних про угоди, заявки та вподобання клієнтів, створювати нагадування про дзвінки та надсилати персональні акції та пропозиції. Операційні функції включають в себе реєстрацію вхідного трафіку, автоматизацію документообігу, фіксацію просування угод по воронці продажів, нагадування та контроль роботи співробітників [6].

Аналітичні функції CRM-систем допомагають виявляти закономірності в продажах, а також аналізувати ефективність маркетингових заходів. Ці дані оновлюються в реальному часі та можуть бути використані для прийняття обґрунтованих рішень [7].

Результати дослідження. CRM-системи стали необхідним інструментом для підвищення ефективності бізнесу в сучасному світі. Вони допомагають компаніям підтримувати і покращувати взаємовідносини з клієнтами, а також оптимізувати всі аспекти управління. Використання CRM-системи дозволяє підвищити лояльність клієнтів, збільшити прибуток та знизити витрати.

У сучасному світі, де конкуренція на ринку дуже велика, важливо мати доступ до актуальної та точної інформації про клієнтів і контрагентів. Це допомагає приймати обґрунтовані рішення та ефективно взаємодіяти зі споживачами. Тому впровадження CRM-системи стає важливим кроком для підвищення конкурентоспроможності та досягнення успіху в сучасному бізнесі.

Висновок. Дослідження використання CRM-систем у сучасних компаніях показало, що ці системи відіграють ключову роль у підвищенні ефективності бізнесу. Основні висновки дослідження включають наступне:

- Підвищення лояльності клієнтів: Використання CRM-систем дозволяє компаніям створити більш індивідуалізований та персоналізований підхід до клієнтів. Це призводить до збільшення задоволеності клієнтів та їхньої лояльності до бренду.

- Зростання прибутку: Аналіз даних у CRM-системах допомагає виявляти потенційні можливості для збільшення продажів та прибутку. Відстеження історії покупок та уподобань клієнтів дозволяє розробляти ефективні маркетингові стратегії та пропозиції.

- Оптимізація процесів: CRM-системи автоматизують багато операційних процесів у компанії, що дозволяє знизити ручну роботу та збільшити ефективність роботи персоналу. Це також допомагає зменшити витрати на управління.

- Аналітика та стратегічне планування: CRM-системи надають змогу аналізувати дані та визначати закономірності в продажах та взаємодії з клієнтами. Це допомагає компаніям розробляти більш обґрунтовані стратегії та прогнози.

- Зменшення ризиків: CRM-системи зберігають історію взаємодії з клієнтами та контрагентами, що дозволяє уникнути втрати цінної інформації при зміні персоналу. Вони також допомагають вчасно реагувати на зміни на ринку та внутрішні зміни в компанії.

Отже, використання CRM-систем є важливим інструментом для підвищення ефективності бізнесу, покращення взаємодії з клієнтами та досягнення успіху на ринку.

Список бібліографічного опису

1. Ганущак-Єфіменко Л.М. CRM-система як ефективний інструмент розвитку готельного бізнесу в Україні. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Економічні науки. 2017. № 4. С. 51–56.
2. Ліщинська Л.Б. Основні аспекти автоматизації роботи з клієнтами засобами CRM-систем. Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. 2015. № 5(1). С. 206–209.
3. CRM система 2023: цифри, прогнози, тенденції / Електронний ресурс. – URL: <https://blog.keycrm.app/uk/crm-sistema-2023-cifri-prognozitendencii/> (дата звернення: 30.08.2023).
4. Бутенко Н.В. Впровадження концепції CRM в бізнес-середовищі. Економіка та держава. 2021. № 3. С. 40–42.
5. Бітрікс24: Результати першого дослідження ринку CRM в Україні / Електронний ресурс. – URL: <https://www.bitrix24.ua/crmresearch2018/> (дата звернення: 21.08.2023).
6. Customer relationship management and customer experience. Customer Relationship Management. 2008. С. 174–194. URL: <https://doi.org/10.4324/9780080949611-13> (дата звернення: 21.09.2023).
7. Rajola F. The Theoretical Framework of CRM. Customer Relationship Management. Berlin, Heidelberg, 2003. С. 9–15. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-24718-0_2 (дата звернення: 21.09.2023).
8. P. Savaryn, V. Strekha, M. Brych, L. Brych, V. Kabak and M. Polishchuk, "The Original Method of Controlling a Computer Using Distance Sensors," 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 683-688, doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9767011.
9. V. Satsyk, O. Mekush, N. Lishchyna, N. Khrystynets, L. Gumeniuk and L. Korobchuk, "Soil Analysis Software Tool for Smart Control of Agronomic Data," 2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ruzomberok, Slovakia, 2022, pp. 364-368, doi: 10.1109/ACIT54803.2022.9913133.

References

1. L.M. Hanushchak-Efimenko CRM system as an effective tool for hotel business development in Ukraine. Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design. Series: Economic Sciences. 2017. No. 4. P. 51–56.
2. Lishchynska L.B. Basic aspects of automation of work with clients by means of CRM systems. Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Economic sciences. 2015. No. 5(1). P. 206–209.
3. CRM system 2023: figures, forecasts, trends / Electronic resource. – URL: <https://blog.keycrm.app/uk/crm-sistema-2023-cifri-prognozitendencii/> (access date: 30.08.2023).
4. Butenko N.V. Implementation of the CRM concept in the business environment. Economy and the state. 2021. No. 3. P. 40–42.
5. Bitrix24: Results of the first survey of the CRM market in Ukraine / Electronic resource. – URL: <https://www.bitrix24.ua/crmresearch2018/> (date of application: 08/21/2023).
6. Customer relationship management and customer experience. Customer Relationship Management. 2008. pp. 174–194. URL: <https://doi.org/10.4324/9780080949611-13> (date of access: 09/21/2023).
7. Rajola F. The Theoretical Framework of CRM. Customer Relationship Management. Berlin, Heidelberg, 2003. P. 9–15. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-24718-0_2 (date of access: 09/21/2023).
8. P. Savaryn, V. Strekha, M. Brych, L. Brych, V. Kabak and M. Polishchuk, "The Original Method of Controlling a Computer Using Distance Sensors," 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 683-688, doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9767011.
9. V. Satsyk, O. Mekush, N. Lishchyna, N. Khrystynets, L. Gumeniuk and L. Korobchuk, "Soil Analysis Software Tool for Smart Control of Agronomic Data," 2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ruzomberok, Slovakia, 2022, pp. 364-368, doi: 10.1109/ACIT54803.2022.9913133.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-02>

УДК 37.035.3

Лавров Євгеній Анатолійович, д.т.н., професор,

<https://orcid.org/0000-0001-9117-5727>

Чибіряк Яна Іванівна, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-0634-7609>

Сумський державний університет, м. Суми, Україна

Сірик Ольга Євгенівна, к.ф.-м.н.,

<https://orcid.org/0000-0001-9360-4388>

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна

Великодний Дмитро Володимирович, к.ф.-м.н.,

<https://orcid.org/0000-0003-0044-5619>

Боровик Валентина Олександрівна, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-3668-6302>

Сумський державний університет, м. Суми, Україна

ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ЕКСПЕРТНОГО ОЦІНЮВАННЯ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ СТРАТЕГІЧНИХ І ТАКТИЧНИХ РІШЕНЬ

Лавров Є.А., Чибіряк Я. І., Сірик О. Є., Великодний Д. В., Боровик В. О. Підхід до побудови автоматизованих систем експертного оцінювання для підтримки прийняття стратегічних і тактичних рішень. Розглянуті проблемні питання підтримки прийняття рішень на рівні суспільства, регіону, виробничої системи. Доведено необхідність широкого використання методів експертного оцінювання альтернатив та використання систем гібридного інтелекту. Розроблено концепцію побудови нового покоління автоматизованих систем експертного оцінювання варіантів розвитку складних систем. Наведено приклади використання автоматизованої експертизи для забезпечення стійкого розвитку систем різноманітного призначення.

Ключові слова: сталий розвиток, система підтримки прийняття рішень, експертне оцінювання, гібридний інтелект, Україна.

Lavrov E.A., Chybiriak Ya. I., Siryk O. E., Velykodnyi D. V., Borovyk V. O. An approach to building automated expert assessment systems to support strategic and tactical decision-making. The study considered problematic issues of decision support at the level of society, the region, and the production system. The necessity of widespread use of expert evaluation of alternatives and the use of hybrid intelligence systems is proved. The paper developed the concept of building a new generation of automated systems for expert evaluation of complex system development options. The results show examples of using automated expertise to ensure the sustainable development of systems for various purposes.

Keywords: sustainable development, decision support system, expert assessment, hybrid intelligence, Ukraine.

1 Вступ.

Світові лідери дедалі частіше заявляють про необхідність захистити Землю від деградації за рахунок [1-5]:

- раціонального використання природних ресурсів;
- впровадження раціональних моделей виробництва та споживання;
- прийняття термінових дій через зміни клімату;

Справді, останні роки характеризуються [6-12]:

- зростаючими ризиками техногенних катастроф;
- проблемами безробіття та соціальними потрясіннями;
- збільшенням напруженості діяльності людей ціною помилок операторів;
- погрозами продовольчої безпеки.

Особливості сучасного етапу розвитку суспільства такі, як [13-16]:

- перехід до цифрової економіки;
- широке використання технологій електронного уряду та суспільства;
- запровадження складних ієрархічних систем управління підприємствами, корпораціями, територіями, технологіями забезпечення життєдіяльності регіонів,

актуалізують проблему швидких оптимальних рішень щодо вироблення керуючих впливів [1, 10, 12]

Для таких нових складних організаційно-технічних систем, що функціонують в умовах ризиків та невизначеності, стає практично неможливим створення єдиної глобальної математичної моделі, зручної для підтримки прийняття рішень.

В Україні не закінчується широкомасштабна криза, продовжуються бойові дії. Тривають широкі дискусії з питань розвитку країни, окремих областей, підприємств, навчальних закладів, тощо. Назріває гуманітарна і соціально-економічна катастрофа.

В таких умовах все частіше виникає необхідність використання технологій гібридного інтелекту і залучення висококваліфікованих фахівців для експертного оцінювання можливих сценаріїв розвитку, суспільства, регіону, держави [1, 8, 17].

2 Аналіз проблеми та постановка задач дослідження.

Окремі нескладні завдання вибору можуть бути зведені до математичних моделей, які дозволяють знайти оптимальне рішення. На жаль, число вдало формалізованих задач значно поступається числу погано або зовсім не формалізованих, для вирішення яких методи дослідження операцій не підходять [18, 19]. Неможливість формалізації багатьох задач вибору пов'язана з наявністю в них так званої невизначеності. Це означає, що на прийняття рішення впливають фактори, які, з тих чи інших причин, не можливо однозначно визначити та описати [1, 18].

Характер і причини виникнення невизначеності можуть бути різними, в тому числі [18, 20]:

- неповнота чи нечіткість наявної інформації;
- стохастична природа факторів;
- неоднорідність та суб'єктивність критеріїв оцінювання альтернатив.

Тому фахівцями з теорії прийняття рішень постійно досліджуються та розробляються методи опису та обліку невизначеності різного виду. Наприклад, Лотфі Заде створив теорію нечіткої логіки [21], що дозволяє описувати неоднозначність тверджень. В даний час для моделювання невизначеності широко використовують різні логіко-імовірнісні та логіко-лінгвістичні моделі [22].

Проте існують задачі вибору, у яких фактор невизначеності не має в наявності моделі, що дозволяє його адекватно описати і врахувати під час пошуку рішення.

У такому випадку мова йде про унікальні задачі вибору, тобто про те, що в деякому сенсі виникає вперше [1, 23].

Часто при моделюванні складних ієрархічних соціально-економічних систем задача може містити відразу кілька різних видів невизначеності, що ускладнює пошук рішення формальними методами, орієнтованими на взаємодію з факторами невизначеності одного конкретного типу.

Для таких задач у теорії прийняття рішень є окремий напрямок – методи експертного оцінювання, основою яких є сама людина з його суб'єктивними переконаннями, як першоджерело задачі вибору. Дані методи засновані на припущенні, що можна знайти якщо не оптимальне, то хоча б прийнятне рішення, виходячи з аналізу суджень та переконань особи, зацікавленої у виборі кращої альтернативи.

У деяких випадках суб'єкт, який перебуває в ситуації вибору, не може самостійно впорядкувати свої переконання і потребує допомоги. В інших випадках він просто не володіє необхідним рівнем знань, тобто не може вирішити поставлену перед ним задачу.

Тоді подібно до того, як під час моделювання реальний об'єкт замінюється подібною йому моделлю, вихідний суб'єкт замінюється експертом-фахівцем, який має потрібний рівень знань для того, щоб на основі аналізу його суджень і переваг можна було вирішити задачу вибору. Як правило, щоб знизити вплив фактору суб'єктивності та зібрати більше інформації, замість одного задіють цілу групу експертів.

На жаль, існує думка, що наявність великої бібліотеки математичних методів експертного оцінювання альтернатив, наприклад [22, 24-30], повністю закриває проблему вибору в управлінні складними об'єктами.

Насправді некоректна організація експертного оцінювання, особливо у задачах планування сталого розвитку складних організаційно-технічних і соціальних систем, може призвести до неправильних орієнтирів та величезних збитків.

Ми поставили експеримент стосовно:

- планування соціально-економічних заходів розвитку міста;
- експертизи навчальних електронних модулів у системі електронного навчання;
- вибору вектору розвитку промислового підприємства (механічне виробництво).

Застосування різних груп експертів та різних методів оцінки альтернатив призвели до принципово різних результатів.

У зв'язку з цим у даній статті поставлено задачу визначення принципів побудови та системи робіт, необхідних для організації автоматизованих систем експертного оцінювання рішень з управління сталим розвитком складних технологічних та соціально-економічних об'єктів.

3 Результати.

3.1 Інтелектуальний агент-менеджер для вирішення локальних задач експертного оцінювання. Для вирішення локальних задач управління пропонується ідея технології інтелектуального агента-менеджера [31, 32], який використовує найпотужніші інтелектуальні ресурси (на сьогоднішній день) – людей. Цей агент шляхом взаємодії з мільйонами користувачів через мережу Internet зацікавлює та залучає потрібних фахівців і досягає рішення поставленої задачі, представлене в прийнятному для людини вигляді (рис. 1, рис. 2).

Агент-менеджер здійснює пошук користувачів через Інтернет та встановлює зв'язок з ними за допомогою засобів комунікації. У результаті спілкування агента з користувачами формується база даних. Далі потенційні вирішувачі, що потрапили до бази даних, беруть участь у вирішенні задач, які агент чи особа, що приймає рішення (ОПР) пропонує їм вирішити за фінансову компенсацію.



Рисунок 1 – Система прийняття рішень з використанням агента-менеджера та інтелектуальних вирішувачів (експертів) [31-34]

На вхід системи подається умова задачі природною мовою, а також інформація про матеріальні та часові ресурси, що виділяються на вирішення даної задачі. У деяких випадках перед розв'язанням задачі буває зручно провести її декомпозицію. Після того, як задачу розбито на k підзадач, у базі потенційних вирішувачів відбувається відбір найбільш відповідних спеціалістів. Обраним вирішувачам надаються умови задач, після чого агент-менеджер здійснює контроль за виконанням робіт і через деякий час отримує в ідеалі k готових рішень. Ці k рішень аналізуються і за допомогою агента чи ОПР перетворюються на остаточне рішення задачі.

До переваг технології відноситься перспективність.

Недоліки:

- неможливість (на даний час) вирішувати складні задачі глобального характеру;
- неможливість залучення сторонніх осіб до вирішення стратегічних задач, задач безпеки, секретних задач;
- високі ризики, пов'язані з кіберзлочинністю.

3.2 Концепція автоматизованої системи експертного оцінювання.

Для глобальних складних задач, пов'язаних з великими ризиками та матеріальними витратами, технологія агента-менеджера не завжди може бути рекомендована до використання. У зв'язку з цим

обґрунтуємо необхідність створення нового класу систем – автоматизованих систем експертного оцінювання (АСЕО).

Методи експертного оцінювання не завжди спрямовані безпосередньо на вирішення задач вибору, і ціль проведення експертизи може бути пов'язана з певною задачею лише опосередковано.

Такими цілями можуть бути:

- оцінка якості об'єктів експертизи та їх відповідності певним стандартам та вимогам;
- прогноз динаміки розвитку та майбутнього стану об'єкта експертизи;
- розробка системи критеріїв та методів оцінювання об'єкта.

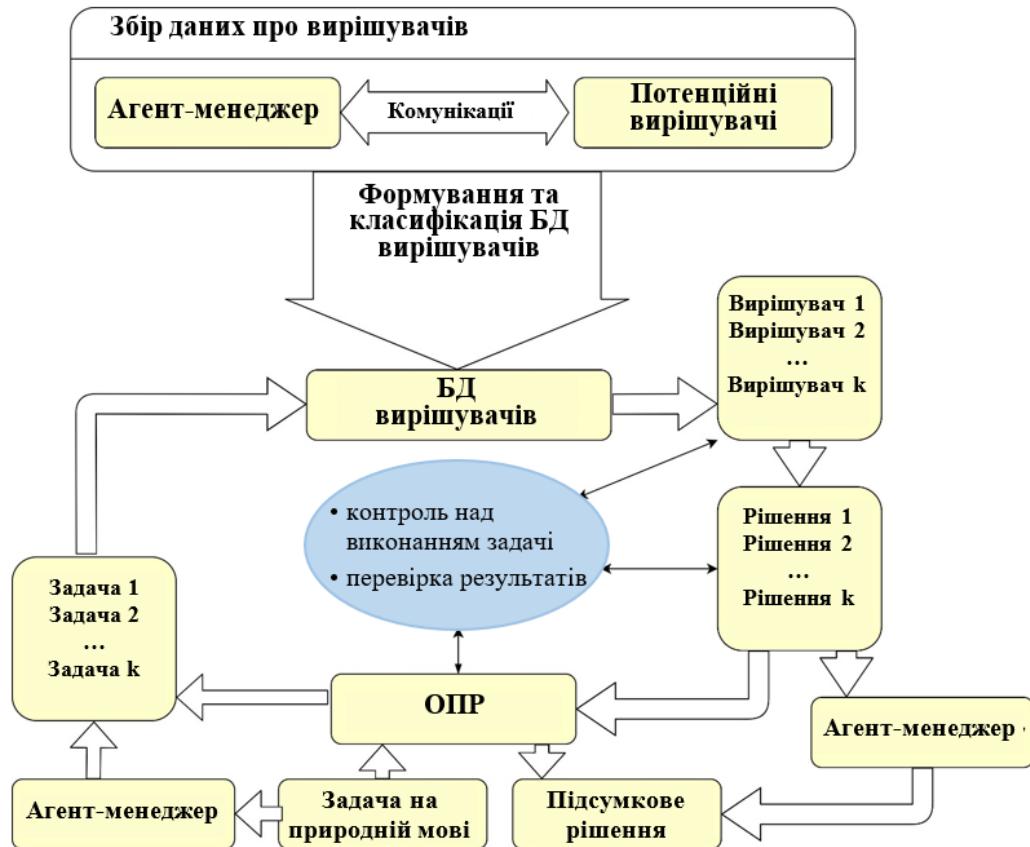


Рисунок 2 – Принцип прийняття рішень з використанням технології агента-менеджера [31-34]

Крім експертної групи, яка виконує роль колективних ОПР, активну участь під час проведення експертизи повинна приймати робоча група. Робоча група відповідає за організаційні аспекти та проведення експертизи, забезпечує ефективну роботу експертів та своєчасну підготовку результатів.

Усередині робочої групи можна виділити функціональні підгрупи відповідно до виконуваних ними функцій:

- організатори – фахівці, які відповідають безпосередньо за організацію та проведення експертизи;
- когнітологи – фахівці, які відповідають за вилучення експертної інформації та комунікацію як робочої групи з експертами, так і експертів між собою при необхідності керувати спілкуваннями усередині експертної групи;
- аналітики – фахівці, які відповідають за аналіз та обробку отриманої від експертів інформації;
- технічний персонал, відповідальний за виконання допоміжних функцій.

Можна сказати, що методи експертного оцінювання спираються на принцип: *"поганий план кращий, ніж його повна відсутність, оскільки навіть поганий план надає можливість свідомо рухатися до мети, контролюючи процес її досягнення"*.

Процес досягнення мети експертизи розбивається на кілька послідовних (ітеративно повторюваних) етапів. Частина може бути максимально формалізована, частина – не піддаватися формалізації (на сучасному рівні розвитку науки).

Таким чином, проведення експертизи є складною організаційно-аналітичною діяльністю, для виконання якої потрібні ресурси:

- фахівці;
- приміщення;
- технічне та програмне забезпечення;
- фінанси;
- час.

Необхідність ефективного використання усіх перелічених ресурсів призводить до постановки задачі автоматизації діяльності, пов'язаної з проведенням експертиз, тобто з розробкою та впровадженням автоматизованих систем експертного оцінювання (АСЕО).

Нефахівці іноді помилково вважають, що такі системи вже давно функціонують.

На жаль, найчастіше мають на увазі локальну (обмежену) автоматизацію. Справді, різноманітні експертні системи (ЕС) та системи підтримки прийняття рішень (СППР) використовуються вже кілька десятиліть. Однак при цьому мають суттєво обмежені можливості.

ЕС призначені для масового використання і надають можливість спеціалістам недостатньо високої кваліфікації для вирішення поставлених задач використовувати досвід і знання висококваліфікованих фахівців – експертів. ЕС можуть застосовуватися для вирішення задач діагностики, навчання, інтерпретації, проектування, пошуку альтернативних варіантів рішень. Основою будь-якої ЕС є знання про конкретну предметну галузь, які мають бути певним чином структуровані, закодовані, супроводжені сукупністю правил логічного висновку та готові до використання. Відмінні риси ЕС:

- можливість обґрунтування та пояснення отриманого рішення зрозумілим людині способом;
- орієнтованість на застосування у конкретній предметній сфері, для якої вона спеціально розроблялася.

СППР є комп'ютерними системами, мета яких полягає у підтримці діяльності керівних осіб, які приймають управлінські рішення, зокрема шляхом забезпечення всебічного та об'єктивного аналізу вирішуваної проблеми. Даний вид систем виник у результаті злиття управлінських інформаційних систем та систем управління базами даних.

Відмінність СППР від ЕС полягає в тому, що в них ключову роль грає ОПР, яка несе повну відповідальність за прийняті рішення, а отже потребує повного контролю над процесом прийняття та реалізації рішень.

Таким чином, ні ЕС, ні СППР не є адекватною відповіддю на питання про автоматизацію проведення експертиз рішень щодо управління стійким розвитком складних технологічних та соціально-економічних об'єктів.

Недоліки ЕС і СППР – не мають необхідних властивостей адаптивності та універсальності, оскільки від самого початку орієнтовані на вирішення задач певної предметної сфери або специфічних.

Зазначеними властивостями повинні володіти системи нового покоління – АСЕО.

АСЕО повинна представляти собою набагато більше у сенсі функціональності, адаптивності, охоплення процесів проведення експертизи, інтелектуальності, ніж ЕС чи СППР.

Вимоги до АСЕО – здійснювати підтримку всіх етапів експертизи незалежно від:

- поставлених цілей;
- програми та методики експертизи;
- предметної галузі;
- вибраних критеріїв оцінювання та їх шкал;
- виду експертних оцінок та способу їх отримання.

Ідея та організаційна структура АСЕО наведені на рис. 3.

АСЕО – набір програмних модулів, що гнучко налаштовуються і довільно пов'язуються, з яких користувач системи зможе зібрати і налаштувати таку версію системи, яка буде повністю відповідати цілям і завданням конкретної експертизи. Ядро АСЕО – великий комплекс моделей, методів і критеріїв, що використовуються під час збору, аналізу та обробки експертних оцінок (йдеться не просто про інтелектуальну систему, а про середовище розробки експертної системи).

Крім зазначеної проблеми доцільність та практична можливість створення АСЕО багато в чому визначається ступенем досяжної формалізації окремих етапів експертизи, оскільки навряд чи можна автоматизувати те, що не можливо уявити у вигляді формальної моделі. Тому окремо розглянемо основні етапи експертизи з погляду можливості їх формалізації та автоматизації.

3.3 Етапи експертизи в умовах автоматизованої системи експертного оцінювання.

Етап 1: постановка мети експертизи.

Учасники та виконавці: замовник експертизи, робоча група (організатори).

Етап є фундаментом всієї експертизи та проводиться у процесі укладення договору із замовником експертизи – індивідуальною чи колективною особою, яка для вирішення поставленої задачі потребує допомоги сторонніх фахівців.

Здійснюється комунікація між замовником та організаторами експертизи, а також відбувається вирішення адміністративних та фінансових питань.

Засоби (задачі) автоматизації (елементи АСЕО):

- менеджер пошуку експертів;
- засоби комунікації.

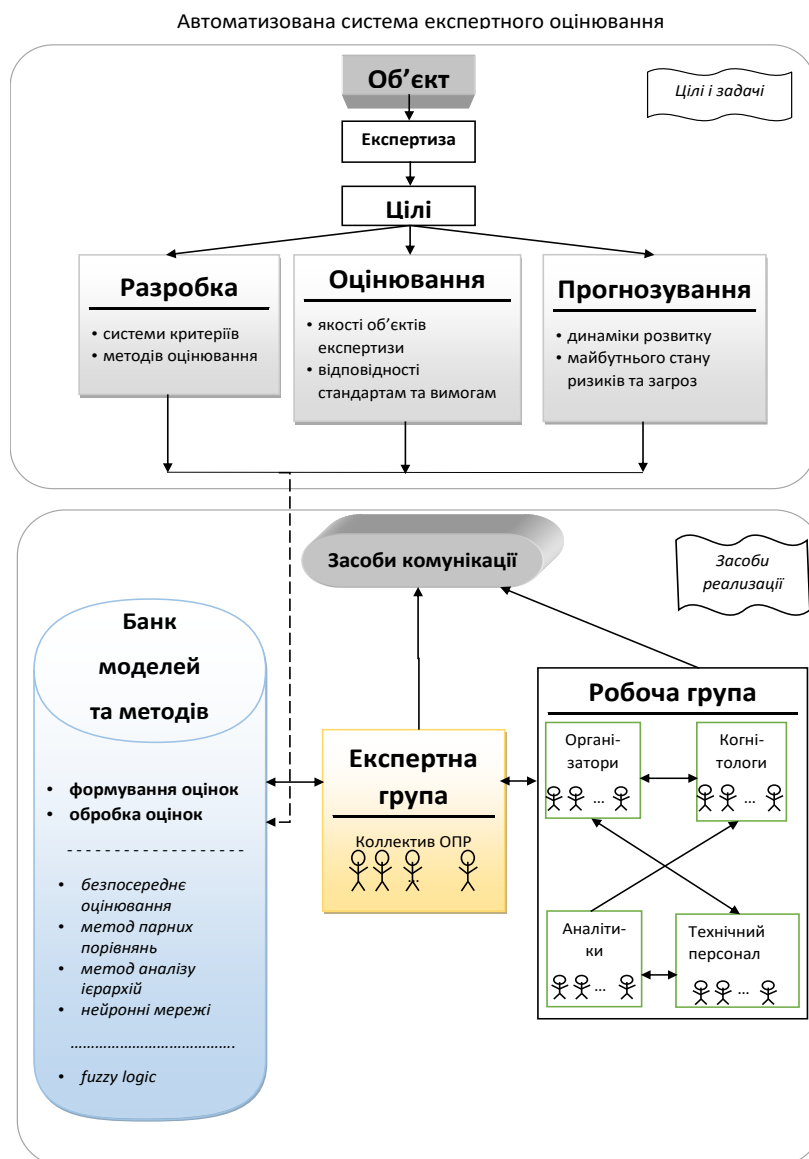


Рисунок 3 – Ідея та організаційна структура АСЕО

Етап 2: розробка програми та визначення методики експертизи.

Учасники та виконавці: робоча група, можлива участь замовника.

Даний етап починається з того, що робоча група, включаючи не тільки організаторів, а також аналітиків та когнітологів, розробляє план проведення експертизи, виходячи з мети експертизи, вимог замовника, встановлених термінів проведення та наявних ресурсів (фінансових, кадрових, обчислювальних та ін.).

Для цього робочою групою складається список проміжних цілей та завдань, які мають бути виконані для досягнення глобальної мети експертизи. Потім визначається, як пункти списку пов'язані між собою, яких ресурсів вимагають, у які терміни можуть і повинні бути виконані, хто відповідатиме за це. Можна сказати, що програма експертизи має дати відповіді на запитання:

- що потрібно зробити?
- коли це необхідно зробити?
- хто це робитиме?

Визначення методики проведення експертизи може бути проведено як паралельно з розробкою програми, так і після того, як програму вже підготовлено. Для кожної проміжної задачі з великого арсеналу методів експертного оцінювання вибирається адекватний інструмент виконання з урахуванням наявних ресурсних обмежень. Методика експертизи покликана дати відповідь на питання, як саме виконуватиметься кожен пункт програми експертизи.

Як бачимо, етап розробки програми та визначення методики експертизи є багато в чому творчим процесом, в якому задіяна велика кількість людей.

Повністю виключити участь людини у виконанні даного етапу експертизи в найближчому майбутньому є малоімовірним. Проте процес розробки програми та визначення методики експертизи можна значною мірою формалізувати, представивши його у вигляді побудови алгоритму проведення експертизи з деякого набору базових блоків, що адаптуються під певний набір вимог.

Що заважає розробити інформаційну систему (ІС) підтримки діяльності робочої групи на цьому етапі? По-перше, масштаби роботи, який належить виконати розробникам такої ІС: спектр методів і видів експертних оцінок дуже широкий і різноманітний, і створення комп'ютерної системи, що відображає цю різноманітність потребує значної праці. По-друге, нерідко обрані методи та алгоритми експертного оцінювання доводиться певним чином адаптувати під конкретну задачу або предметну область, тому врахувати заздалегідь усі нюанси просто неможливо.

Засоби (задачі) автоматизації (елементи АСЕО):

- візуальний редактор, який дозволяє робочій групі:
 - будувати та редагувати програму проведення експертизи у вигляді деякої візуальної структури (з використанням у т.ч. методології управління проектами, діаграм Ганта, тощо);
 - здійснювати змістовне наповнення блоків побудованої структури.

Етап 3: формування експертної групи.

Учасники та виконавці: робоча група, можлива участь експертів.

Вирішуються завдання експертизи, спрямовані на підбір експертів, робота з якими дозволить успішно досягти основної мети експертизи.

Для цього на попередньому етапі має бути встановлено:

- якою буде структура експертної групи гомогенною чи гетерогенною, локалізованою у часі та просторі чи ні;
- яким чином здійснюватиметься підбір конкретних експертів;
- як забезпечуватиметься мотивація експертів до сумлінного виконання своїх обов'язків.

У гомогенних експертних групах всі члени мають однакове право голосу.

У гетерогенних групах експерти відрізняються один від одного вагою своїх суджень залежно від спеціалізації, компетентності, об'єктивності, певних особистих якостей та ін.

Іноді під час проведення експертизи використовують так звані експертні оцінки другого роду: судженню кожного експерта відповідає ваговий коефіцієнт, що відображає ступінь довіри до даного судження.

Зазвичай подібні вагові коефіцієнти називають коефіцієнтами компетентності експертів, і їх визначення є важливою задачею, оскільки від компетентності експертів безпосередньо залежить якість результатів експертизи.

Структура експертної групи також залежить від запланованого у програмі способу комунікації робочої групи з експертами (насамперед – від способу їхнього опитування), а також експертів між собою. В одних випадках потрібно зібрати всіх експертів разом для проведення

дебатів, а в інших взаємодія з експертами може здійснюватися віддалено. Деякі види опитування полягають у індивідуальній роботі з кожним експертом.

Для визначення безпосереднього складу експертної групи пропонуємо метод "снігової грудки", коли ядро експертної групи визначається робочою групою (наприклад, у результаті аналізу наукових публікацій потенційних експертів), а потім кожен експерт називає фахівців, які, на його думку, могли б виступити експертами в даному випадку. Це повторюється, доки експертна група не буде повністю сформована.

Очевидно, що вибір структури експертної групи неоднозначний і залежить від різних факторів, а тому важко формалізується.

З іншого боку, задача оцінки компетентності експертів та підбору кандидатур, що відповідають заданим робочою групою вимогам, цілком під силу АСЕО, але для цього мають виконуватися дві умови:

- по-перше, така система повинна містити моделі та методи оцінки різних характеристик експертів: компетентності, об'єктивності та ін.
- по-друге, повинна існувати база даних, що містить всю необхідну інформацію про експертів, аналізуючи яку система відбиратиме відповідних кандидатів.

Засоби (завдання) автоматизації (елементи АСЕО):

- автоматичний багатокритеріальний підбір кандидатур, що відповідають заданим критеріям якості, для формування структури експертної групи, заданої користувачем.

Етап 4: отримання експертної інформації.

Учасники та виконавці: когнітологи та експертна група.

Визначальними аспектами цього етапу є:

- форма подання експертної інформації (вид або формат експертних оцінок);
- обрана процедура опитування.

Найзручнішими для формалізації та обробки є кількісні точкові оцінки.

Менш зручними є інтервальні оцінки. Це пов'язано з тим, що навантаження щодо формалізації своєї думки лягає на самих експертів, нехай вони при цьому і отримують допомогу від фахівців із вилучення інформації.

Проте попередньо когнітологам спільно з аналітиками належить розробити систему критеріїв, які надалі й використовуватимуть експерти.

Для цього потрібно:

- скласти повний (але при цьому ненадлишковий) список критеріїв;
- визначити структуру зв'язків між критеріями;
- оцінити відносну важливість критеріїв (зазвичай при цьому доводиться залучати експертів);
- розробити кожному критерію адекватну шкалу і інтерпретувати її значення.

АСЕО має здійснювати підтримку розробки системи критеріїв оцінювання подібно до того, як це викладено для етапу розробки програми експертизи (методологія теорії управління проєктами).

Різного роду якісні оцінки (ранжування, вербальні оцінки, логічні судження та ін.) значно зручніші та зрозуміліші для експертів, проте формалізувати їх у рамках АСЕО і, відповідно, обробляти набагато важче.

Способи опитування експертів варіюються від гранично формальних до вільних: від методів закритого анкетування до відкритих дебатів між експертами.

Тому людино-машинні методи та процедури вилучення експертних знань, що передбачають безпосередню взаємодію між експертом та АСЕО, далеко не завжди можуть бути практично реалізовані, оскільки цей підхід вимагає високого рівня опрацювання та формалізації процедури опитування.

Засоби (завдання) автоматизації (елементи АСЕО):

- візуальний редактор, який надає робочій групі інструментарій для розробки та подальшої модифікації системи критеріїв оцінювання;
- інтерактивна система, що дозволяє проводити ефективне опитування експертів;
- база для зберігання експертної інформації.

Етап 5: аналіз та обробка експертної інформації.

Учасники та виконавці: аналітики та експертна група.

Отримана від експертів інформація аналізується та обробляється відповідно до методів, моделей та критеріїв, передбачених методикою експертизи.

Ступінь формалізації розв'язуваних цьому етапі задач насамперед залежить від виду чи формату, у якому представлена отримана від експертів інформація. Аналіз та обробка експертних оцінок – це найбільш опрацьований і зручний для автоматизації розділ методології експертного оцінювання, оскільки більшість складових його методів має математичну або статистичну природу.

Складність, як уже відмічалось при розгляді другого етапу, полягає у масштабі роботи, пов'язаній з імплементацією в АСЕО всіх можливих методів і моделей, які використовуються під час роботи з різними видами експертних оцінок.

Засоби (задачі) автоматизації (елементи АСЕО):

- набір комп'ютерних інструментів для аналізу та обробки експертних оцінок;
- база даних, що зберігає результати експертизи.

Етап 6: підбиття результатів експертизи.

Учасники та виконавці: організатори та аналітики.

За результатами попереднього етапу менеджери та аналітики оформляють необхідні звіти та передають їх замовнику у формі, початково встановленої на першому етапі. У цьому випадку АСЕО має генерувати гнучкі звіти про результати експертизи (з використанням технологій типу OLAP).

Засоби (задачі) автоматизації (елементи АСЕО):

- електронна система підготовки звітності з можливістю варіативної гнучкої візуалізації даних (типу OLAP).

3.4 Апробація.

Експериментальний варіант АСЕО фрагментарно використовувався для:

- розроблення стратегій розвитку міської інфраструктури;
- ергономічну експертизу складних систем у т.ч. освітніх технологій;
- ряду інших складних об'єктів.

Суть проблемної ситуації визначення пріоритетних напрямів розвитку міста показано на рис.

4.

Очевидно, що проблема розподілу бюджетних коштів цікавить величезну кількість учасників бюджетного процесу. Використання елементів технології АСЕО дозволило для одного з обласних центрів України суттєво скоротити соціальну напруженість у міській Раді та місті в цілому та відносно раціонально розподілити бюджетні кошти.



Рисунок 4 – Демонстрація проблемної ситуації "Визначення пріоритетів розвитку міста"

Ідею застосування АСЕО для атестації електронних навчальних модулів в університетському освітньому середовищі [35-37] продемонстровано на рис. 5.

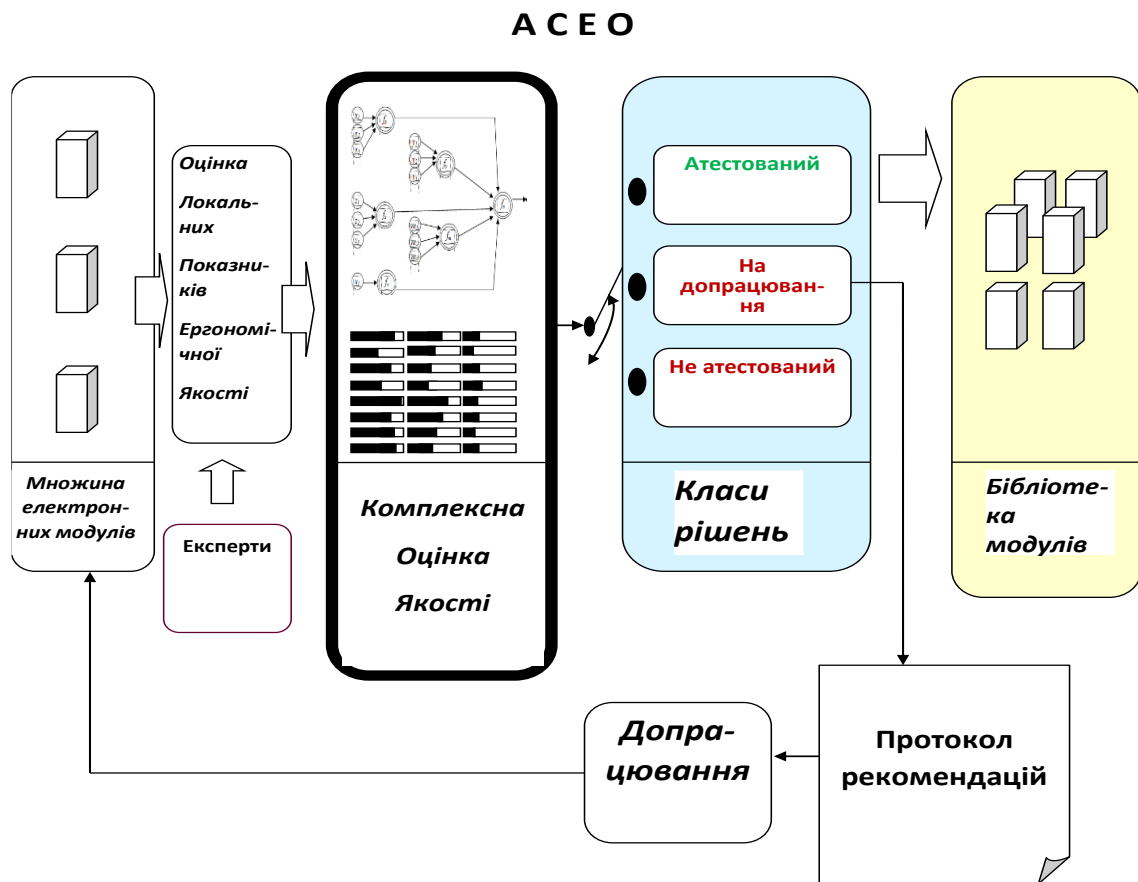


Рисунок 5 – Приклад використання АСЕО для ергономічної атестації електронних модулів у системі електронного навчання

Застосування технології АСЕО дозволило за оцінками [37] підвищити ефективність роботи з формування банку атестованих електронних навчальних матеріалів:

- у порівнянні з технологією ЕС – у 4,73 рази;
- у порівнянні з неавтоматизованою технологією – у 17,5 рази.

В результаті значно підвищилася якість навчального процесу та привабливість нових форм електронного навчання.

4 Висновок.

В Україні загострюються економічні, соціальні, політичні і інші проблеми. Тривають бойові дії. Під загрозою саме існування економіки, країни і нації. Проблеми сталого управління в таких умовах вимагають високоякісного експертного оцінювання можливих альтернативних сценаріїв розвитку. Необхідна докорінна зміна стратегій підтримки прийняття рішень.

Існує думка, що експертна сфера прийняття рішень може бути автоматизована практично повністю шляхом заміни експертів базами експертних знань.

Показано, що в багатьох випадках це не зовсім правильно, оскільки багато експертиз орієнтовані на вирішення погано вивчених або навіть унікальних задач, які лише згодом, по мірі їх вивчення та структуризації, можуть бути вирішені іншими, більш строгими методами. Ефективне вирішення задач експертного оцінювання можливе за умови використання нового запропонованого в даній роботі класу систем – автоматизованих систем експертного оцінювання, які суттєво відрізняються від існуючих експертних систем та систем підтримки прийняття рішень, орієнтованих на вузький клас систем. Обґрунтовані ступінь автоматизації проведення експертиз, а

також склад методів та програмних засобів можуть бути рекомендовані для створення ефективних автоматизованих систем експертного оцінювання.

Наукова новизна результатів полягає в тому, що на відміну від локальних моделей отримання та обробки експертних оцінок, орієнтованих зазвичай на вузьку проблемну сферу, розроблена технологія дозволяє інтегрувати наявні методи та засоби в одній системі, що гнучко налаштовується під конкретну проблемну ситуацію і враховує можливості людини і комп'ютерної системи підтримки процесів прийняття рішень. Це створює передумови для створення нового покоління систем експертного оцінювання, заснованих на гібридних людино-машинних процедурах прийняття колективних рішень (гібридних інтелектуальних систем).

Подяка

Автори дякують д.т.н. проф. Падерно П.Й. та к.т.н. доц. Буркову Є.О. за підтримку даної роботи, надані консультації і матеріали.

Список бібліографічного опису

1. Ślusarczyk, J. (2023). Environmental protection in NATO policy. *Scientific Journal of the Military University of Land Forces*, 208(2), 091–103. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.7268>
2. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Iyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
3. Baranov, V., & Makhutov, N. (2019). Structural Analysis of Processes of Sustainable Development of Systems of Social Environment. 2019 Twelfth International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD), 1–5. <https://doi.org/10.1109/MLSD.2019.8911073>
4. Tokognon, J. P. R., & Yunfei, S. (2018). Innovation Policy for Sustainable Development of SMEs in Benin. 2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), 511–517. <https://doi.org/10.1109/GTSD.2018.8595524>
5. Kolesnikov, A. M., Kokodey, T. A., Lomachenko, T. I., & Mikhailov, Y. I. (2018). Modeling the Optimal Format of Strategic Management of a Company for Establishing a Region's Sustainable Development. 2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS), 848–850. <https://doi.org/10.1109/ITMQIS.2018.8525126>
6. Lozov, R. K., Baranov, A. A., Ermak, S. V., & Semenov, V. V. (2019). The orientation error of a quantum frequency standard in on-board equipment of the satellite navigation systems. In joint international conference on astrophysics for young scientists (pp. 77-82)
7. Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D., & Zhang, C. (2016). Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Computer Networks*, 101, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.017>
8. Sawangsri, W., Suppasawat, P., Thamphanchark, V., & Pandey, S. (2018). Novel Approach of an Intelligent and Flexible Manufacturing System: A Contribution to the Concept and Development of Smart Factory. 2018 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICSSE.2018.8520029>
9. Lavrov, E., Chybirak, Y., Siryk, O., Logvinenko, V., Zakharova, A. Training of Specialists for Adaptive management. Techniques for Teaching Computer Analysis of Automated Production Systems in the FlexSim Environment (2022) CEUR Workshop Proceedings, 3104, pp. 106-118.
10. Cacciabue, P. (2004). Human error risk management for engineering systems: a methodology for design, safety assessment, accident investigation and training. *Reliability Engineering & System Safety*, 83(2), 229–240. <https://doi.org/10.1016/j.res.2003.09.013>
11. Rothmore, P., Aylward, P., & Karnon, J. (2015). The implementation of ergonomics advice and the stage of change approach. *Applied Ergonomics*, 51, 370–376. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.06.013>
12. Kukhar, V., Yelistratova, N., Burko, V., Nizhelska, Y., & Aksionova, O. (2018). Estimation of occupational safety risks at energetic sector of Iron and Steel Works. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2.23), 216. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11922>
13. Radziwon, A., Bilberg, A., Bogers, M., & Madsen, E. S. (2014). The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions. *Procedia Engineering*, 69, 1184–1190. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.108>
14. Vorobieva, D., Kefeli, I., Kolbanov, M., & Shamin, A. (2018). Architecture of Digital Economy. 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICUMT.2018.8631210>
15. Desyatirikova, E. N., Myshovskaya, L. P., Desyatirikov, A. N., & Kolosov, A. I. (2019). Automatic Control of the Sustainability of Digital Transformation Processes in the Digital Economy. 2019 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS), 235–238. <https://doi.org/10.1109/ITQMIS.2019.8928446>
16. Sharakhina, L. V., Azarova, L. V., Bykov, I. A., & Achkasova, V. A. (2018). Government communication strategies of global city: Opportunities and risks. 2018 IEEE Communication Strategies in Digital Society Workshop (ComSDS), 54–56. <https://doi.org/10.1109/COMSDS.2018.8354987>
17. Bundzel, M. (2018). Towards collective intelligence. 2018 IEEE 16th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI), 000015–000016. <https://doi.org/10.1109/SAMI.2018.8324847>
18. Kaplan, E. H. (2016). Adventures in Policy Modeling! 2016 Winter Simulation Conference (WSC), 2–2. <https://doi.org/10.1109/WSC.2016.7822073>

19. De, M. D. P. K. (2014). Study of possibility programming in stochastic fuzzy multiobjective linear fractional programming problem. 2014 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), 331–337. <https://doi.org/10.1109/ISCO.2014.7103970>
20. Borisova, L., Dimitrov, V., & Nurutdinova, I. (2017). Algorithm for assessing quality of fuzzy expert information. 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 1–4. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2017.8110107>
21. Zadeh, L. A. (1996). The evolution of systems analysis and control: a personal perspective. IEEE Control Systems, 16(3), 95–98. <https://doi.org/10.1109/37.506401>
22. Moiseev, D. (2019). Methodology of Probabilistic Representation and Transformation of Information. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 1–5. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934304>
23. ACI, C., SEYREK, S., & CIRAK, A. (2018). A Score-Based Expert System Application for Paper-Reviewer Assignment Problem. 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP), 1–5. <https://doi.org/10.1109/IDAP.2018.8620885>
24. Spivak, I., Krepych, S., & Krepych, R. (2018). Construction of the Criterion for the Agree of Expert Groups Estimates Based on Analysis of Interval Data. 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 261–264. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2018.8632053>
25. H. K. Jabbar and R. Z. Khan, "Survey on development of expert system in the areas of Medical, Education, Automobile and Agriculture," 2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), New Delhi, India, 2015, pp. 776-780.
26. Burkov, E. A., Lyubkin, P. L., & Paderno, P. I. (2017). Intellectual systems - the future of expert assessment. 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 34–36. <https://doi.org/10.1109/SCM.2017.7970487>
27. Paderno, P. I., Burkov, E. A., & Lavrov, E. A. (2020). Issues of organization of expertise and problems of expert assessments. Journal of Physics: Conference Series, 1703(1), 012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1703/1/012047>
28. Paderno, P. I. et al. (2021). Expert Classification: Resource-Based Approach. 2021 XXIV International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 31–33. <https://doi.org/10.1109/SCM52931.2021.9507119>
29. Burkov, E. A. et al. (2020). Analysis of Impact of Marginal Expert Assessments on Integrated Expert Assessment. 2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 14–17. <https://doi.org/10.1109/SCM50615.2020.9198772>
30. Paderno, P. I. et al. (2021). Expert Classification: Probabilistic Estimates. 2021 XXIV International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 28–31. <https://doi.org/10.1109/SCM52931.2021.9507116>
31. Mochalov, V. (2015). Multi-agent bio-inspired algorithms for wireless sensor network design. 2015 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICTACT), 33–42. <https://doi.org/10.1109/ICTACT.2015.7224753>
32. Mochalov, V. A., Mochalova, A. V., Chowkwale, B., & Homutov, S. U. (2016). Functional scheme of the environment monitoring systems architecture design. 2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICTACT), 289–295. <https://doi.org/10.1109/ICTACT.2016.7423364>
33. Kuznetsov, V. A., Mochalov, V. A., & Mochalova, A. V. (2016). Ontological-semantic text analysis and the question answering system using data from ontology. 2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICTACT), 651–658. <https://doi.org/10.1109/ICTACT.2016.7423589>
34. Lavrov, E., Paderno, P., Burkov, E., Volosiuk, A., & Lung, V. D. (2020). Expert assessment systems to support decision-making for sustainable development of complex technological and socio-economic facilities. E3S Web of Conferences, 166, 11002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016611002>
35. Lavrov, E., Kuppenko, O., Lavryk, T., & Barchenko, N. (2013). Organizational Approach to the Ergonomic Examination of E-Learning Modules. Informatics in Education, 12(1), 105–123. <https://doi.org/10.15388/infedu.2013.08>
36. Lavrov, E., Lavrova, O. Intelligent adaptation method for human-machine interaction in modular E-learning systems (2019) CEUR Workshop Proceedings, 2393, pp. 1000-1010.
37. Барченко, Н. (2018). Ергономічне забезпечення діалогової людино-машинної взаємодії в модульних системах електронного навчання. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, 253.

References

1. Ślusarczyk, J. (2023). Environmental protection in NATO policy. Scientific Journal of the Military University of Land Forces, 208(2), 091–103. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.7268>
2. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
3. Baranov, V., & Makhutov, N. (2019). Structural Analysis of Processes of Sustainable Development of Systems of Social Environment. 2019 Twelfth International Conference "Management of Large-Scale System Development" (MLSD), 1–5. <https://doi.org/10.1109/MLSD.2019.8911073>
4. Tokognon, J. P. R., & Yunfei, S. (2018). Innovation Policy for Sustainable Development of SMEs in Benin. 2018 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), 511–517. <https://doi.org/10.1109/GTSD.2018.8595524>
5. Kolesnikov, A. M., Kokodey, T. A., Lomachenko, T. I., & Mikhailov, Y. I. (2018). Modeling the Optimal Format of Strategic Management of a Company for Establishing a Region's Sustainable Development. 2018 IEEE International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS), 848–850. <https://doi.org/10.1109/ITMQIS.2018.8525126>

6. Lozov, R. K., Baranov, A. A., Ermak, S. V., & Semenov, V. V. (2019). The orientation error of a quantum frequency standard in on-board equipment of the satellite navigation systems. In joint international conference on astrophysics for young scientists (pp. 77-82)
7. Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D., & Zhang, C. (2016). Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Computer Networks*, 101, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.017>
8. Sawangri, W., Suppasawat, P., Thamphanchark, V., & Pandey, S. (2018). Novel Approach of an Intelligent and Flexible Manufacturing System: A Contribution to the Concept and Development of Smart Factory. 2018 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICSSE.2018.8520029>
9. Lavrov, E., Chybiriak, Y., Siryk, O., Logvinenko, V., Zakharova, A. Training of Specialists for Adaptive management. *Techniques for Teaching Computer Analysis of Automated Production Systems in the FlexSim Environment (2022) CEUR Workshop Proceedings*, 3104, pp. 106-118.
10. Cacciabue, P. (2004). Human error risk management for engineering systems: a methodology for design, safety assessment, accident investigation and training. *Reliability Engineering & System Safety*, 83(2), 229–240. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2003.09.013>
11. Rothmore, P., Aylward, P., & Karnon, J. (2015). The implementation of ergonomics advice and the stage of change approach. *Applied Ergonomics*, 51, 370–376. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.06.013>
12. Kukhar, V., Yelistratova, N., Burko, V., Nizhelska, Y., & Aksionova, O. (2018). Estimation of occupational safety risks at energetic sector of Iron and Steel Works. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2.23), 216. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11922>
13. Radziwon, A., Bilberg, A., Bogers, M., & Madsen, E. S. (2014). The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions. *Procedia Engineering*, 69, 1184–1190. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.108>
14. Vorobieva, D., Kefeli, I., Kolbanov, M., & Shamin, A. (2018). Architecture of Digital Economy. 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICUMT.2018.8631210>
15. Desyatirikova, E. N., Myshovskaya, L. P., Desyatirikov, A. N., & Kolosov, A. I. (2019). Automatic Control of the Sustainability of Digital Transformation Processes in the Digital Economy. 2019 International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS), 235–238. <https://doi.org/10.1109/ITQMIS.2019.8928446>
16. Sharakhina, L. V., Azarova, L. V., Bykov, I. A., & Achkasova, V. A. (2018). Government communication strategies of global city: Opportunities and risks. 2018 IEEE Communication Strategies in Digital Society Workshop (ComSDS), 54–56. <https://doi.org/10.1109/COMSDS.2018.8354987>
17. Bundzel, M. (2018). Towards collective intelligence. 2018 IEEE 16th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI), 000015–000016. <https://doi.org/10.1109/SAMI.2018.8324847>
18. Kaplan, E. H. (2016). Adventures in Policy Modeling! 2016 Winter Simulation Conference (WSC), 2–2. <https://doi.org/10.1109/WSC.2016.7822073>
19. De, M. D. P. K. (2014). Study of possibility programming in stochastic fuzzy multiobjective linear fractional programming problem. 2014 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), 331–337. <https://doi.org/10.1109/ISCO.2014.7103970>
20. Borisova, L., Dimitrov, V., & Nurutdinova, I. (2017). Algorithm for assessing quality of fuzzy expert information. 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 1–4. <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2017.8110107>
21. Zadeh, L. A. (1996). The evolution of systems analysis and control: a personal perspective. *IEEE Control Systems*, 16(3), 95–98. <https://doi.org/10.1109/37.506401>
22. Moiseev, D. (2019). Methodology of Probabilistic Representation and Transformation of Information. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 1–5. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8934304>
23. ACI, C., SEYREK, S., & CIRAK, A. (2018). A Score-Based Expert System Application for Paper-Reviewer Assignment Problem. 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP), 1–5. <https://doi.org/10.1109/IDAP.2018.8620885>
24. Spivak, I., Krepych, S., & Krepych, R. (2018). Construction of the Criterion for the Agree of Expert Groups Estimates Based on Analysis of Interval Data. 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 261–264. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2018.8632053>
25. H. K. Jabbar and R. Z. Khan, "Survey on development of expert system in the areas of Medical, Education, Automobile and Agriculture," 2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), New Delhi, India, 2015, pp. 776-780.
26. Burkov, E. A., Lyubkin, P. L., & Paderno, P. I. (2017). Intellectual systems - the future of expert assessment. 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 34–36. <https://doi.org/10.1109/SCM.2017.7970487>
27. Paderno, P. I., Burkov, E. A., & Lavrov, E. A. (2020). Issues of organization of expertise and problems of expert assessments. *Journal of Physics: Conference Series*, 1703(1), 012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1703/1/012047>
28. Paderno, P. I. et al. (2021). Expert Classification: Resource-Based Approach. 2021 XXIV International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 31–33. <https://doi.org/10.1109/SCM52931.2021.9507119>
29. Burkov, E. A. et al. (2020). Analysis of Impact of Marginal Expert Assessments on Integrated Expert Assessment. 2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 14–17. <https://doi.org/10.1109/SCM50615.2020.9198772>
30. Paderno, P. I. et al. (2021). Expert Classification: Probabilistic Estimates. 2021 XXIV International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), 28–31. <https://doi.org/10.1109/SCM52931.2021.9507116>

31. Mochalov, V. (2015). Multi-agent bio-inspired algorithms for wireless sensor network design. 2015 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 33–42. <https://doi.org/10.1109/ICACT.2015.7224753>
32. Mochalov, V. A., Mochalova, A. V., Chowkwale, B., & Homutov, S. U. (2016). Functional scheme of the environment monitoring systems architecture design. 2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 289–295. <https://doi.org/10.1109/ICACT.2016.7423364>
33. Kuznetsov, V. A., Mochalov, V. A., & Mochalova, A. V. (2016). Ontological-semantic text analysis and the question answering system using data from ontology. 2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 651–658. <https://doi.org/10.1109/ICACT.2016.7423589>
34. Lavrov, E., Paderno, P., Burkov, E., Volosiuk, A., & Lung, V. D. (2020). Expert assessment systems to support decision-making for sustainable development of complex technological and socio-economic facilities. E3S Web of Conferences, 166, 11002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016611002>
35. Lavrov, E., Kупenko, O., Lavryk, T., & Barchenko, N. (2013). Organizational Approach to the Ergonomic Examination of E-Learning Modules. Informatics in Education, 12(1), 105–123. <https://doi.org/10.15388/infedu.2013.08>
36. Lavrov, E., Lavrova, O. Intelligent adaptation method for human-machine interaction in modular E-learning systems (2019) CEUR Workshop Proceedings, 2393, pp. 1000-1010.
37. Barchenko, N. (2018). Ergonomic provision of dialogic human-machine interaction in modular e-learning systems. Dissertation for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences, 253.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-03>

УДК 681.121.89.082.4

Роман Віталій Іванович, доцент, к.т.н.

<https://orcid.org/0000-0002-8546-6752>

Ілючок Віктор Олександрович, студент

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

КОМП'ЮТЕРНА ПРОГРАМА ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОКАНАЛЬНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ

Роман В.І., Ілючок В.О. Комп'ютерна програма для проектування багатоканальних ультразвукових витратомірів. В роботі розроблено аналітичні залежності для розрахунку координат розташування та вагових коефіцієнтів акустичних каналів 5-ти та 6-ти канальних хордових ультразвукових витратомірів. Також реалізовано алгоритм розрахунку рекурентних рівнянь поліному Якобі. Це дозволило удосконалити алгоритм проектування багатоканальних хордових ультразвукових витратомірів. Для реалізації цього алгоритму удосконалено комп'ютерну програму для проектування багатоканальних ультразвукових витратомірів.

Ключові слова: проектування, комп'ютерна програма, ультразвуковий витратомір, акустичні канали, хордова схема, числові методи інтегрування.

Roman V., Ilyuchok V. Software for designing of multipath ultrasonic flow meters. Analytical dependencies for calculating location coordinates and weighting coefficients of acoustic paths of 5- and 6-channel chordal ultrasonic flow meters were developed in the work. The algorithm for calculating the recurrent equations of the Jacobi polynomial is also implemented. This made it possible to improve the designing algorithm of multipath chordal ultrasonic flow meters. To implement this algorithm, a software for designing multipath ultrasonic flow meters has been improved.

Keywords: designing, software, ultrasonic flow meter, acoustic paths, chordal scheme, numerical integration methods.

Проблематика питання. Розвиток комп'ютерних технологій відкрив для проектувальників, науковців (аспірантів та студентів) та виробників, можливість автоматизувати розрахункові процеси – шляхом створення вузькоспеціальних прикладних програм з нуля. Якщо говорити про галузь вимірювання витрати із застосуванням ультразвукових витратомірів (УЗВ), при проектування та симуляції роботи даного типу витратомірів, виникає потреба попереднього розрахунку їх конструктивних характеристик. Зокрема, це стосується розрахунку координат розташування (відстань до осі труби) та вагових коефіцієнтів акустичних каналів (АК) багатоканальних хордових УЗВ. Згідно ISO 7089-1 [1] цей розрахунок виконується, зокрема, із застосуванням числових методів інтегрування (ЧМІ), що вимагає великих затрат людського часу, якщо існує циклічність процесу.

Зважаючи на вище сказане, в роботі [2] було обґрунтовано розробку комп'ютерної програми (калькулятора), яка б у зручній формі дозволяла користувачу швидко та миттєво отримувати згадані конструктивні характеристики УЗВ на базі ЧМІ. Основою розробленої програми стали три класичні ЧМІ – Гауса-Лежандра, Гауса-Чебишева та Гауса-Якобі. В роботі [3] нами продовжено ці дослідження, і після додаткового аналізу наукової літератури, обґрунтовано удосконалення цієї програми, з метою включення до її логіки нових методів, які виникли як модифікація чи удосконалення класичних ЧМІ, і часто застосовуються на практиці. Цими методами, які ми додали до програми, стали ЧМІ Гарріса-Еванса та ЧМІ OWICS.

В даній, заключній роботі, нами поставлено за мету фінальне удосконалення програми – збільшення кількості АК УЗВ з 4 до 6 каналів (подальше збільшення кількості АК немає сенсу щодо діаметру типових вузлів комерційного обліку) для всіх існуючих (в програмі) методів розрахунку (класичних ЧМІ та розроблених на їх основі методів). Також в роботі представлено удосконалений алгоритм проектування багатоканальних хордових УЗВ на базі ЧМІ та інструкція користувача до розробленої на його базі комп'ютерної програми.

Викладення основного матеріалу. Для високоточного обліку енергоносіїв (в комерційних цілях), зокрема газоподібних, рекомендовано застосовувати багатоканальні УЗВ (в якому застосовано більше ніж один АК) [1]. Для обчислення об'ємної витрати багатоканальних хордових УЗВ (q_{USM}), в яких АК лежать в одній площині на певні відстані від осі труби, може бути застосована формула виду [4]:

$$q_{USM} = \pi R^2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{2\sqrt{R^2-x_i^2}}{\pi R} w_i u h_i \right), \quad (1)$$

де R – внутрішній радіус ВТ (або корпусу УЗВ); x_i , w_i – координата розташування (відстань між площиною в якій лежить АК і віссю труби – див.рис.1) та ваговий коефіцієнт i -го АК; $u h_i$ – усереднена вздовж i -го хордового АК швидкість потоку; N – кількість АК.

Якби УЗВ мав два АК (рис.1), то формулу (1) можна було б записати наступним чином:

$$q_{USM} = \pi R^2 \left(\frac{2\sqrt{R^2-x_1^2}}{\pi R} w_1 u h_1 + \frac{2\sqrt{R^2-x_2^2}}{\pi R} w_2 u h_2 \right).$$

Значення x , w та N є конструктивними характеристиками багатоканального хордового УЗВ [1].

Аналізуючи наукові літературні джерела [4-7] встановлено, що значення x та w розраховують із застосуванням класичних ЧМІ та методів, які були розроблені на їх основі (будемо їх називати удосконалені ЧМІ). Використання ЧМІ для задач багатоканальної ультразвукової витратометрії досліджено і представлено також у звіті Американської газової асоціації (AGA Report No.7) та технічній монографії Європейської групи по дослідженню газу (GERG Technical Monograph No.11).

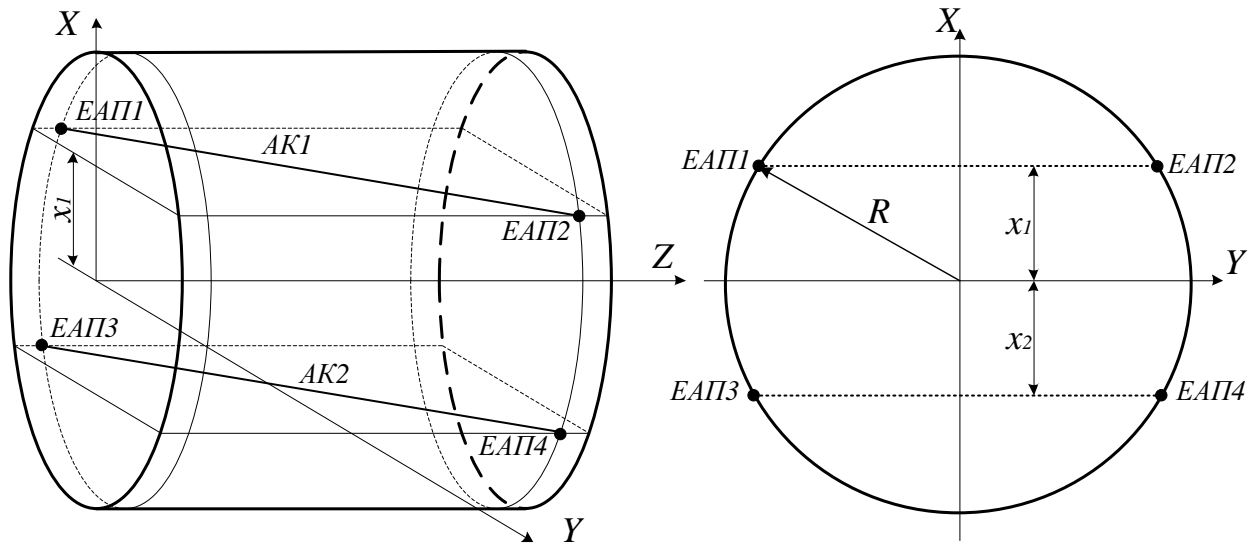


Рисунок 1 – Спрощена схема просторового розташування АК двоканального хордового УЗВ:
 ЕАП – електроакустичний перетворювач

Можуть існувати випадки, коли ЧМІ зовсім не застосовують, або використано інакший (комбінований) математичний апарат [8]. До прикладу, АК УЗВ можна розміщувати відносно осі потоку пропорційно до їх кількості (однакова відстань між АК). Це стосується і визначення вагових коефіцієнтів – кожен АК має однакову вагу, яка залежить тільки від кількості (N). В такому випадку калібрування спроектованого УЗВ вкрай необхідне, а методи (в контексті даної роботи) будуть носити назву – комбіновані.

Зважаючи на вище сказане, нами запропоновано удосконалену класифікацію методів проектування багатоканальних хордових УЗВ, зображену на рис.2.



Рисунок 2 – Класифікація методів проектування багатоканальних хордових УЗВ

Проаналізувавши науково-технічні джерела [14-8] щодо застосування ЧМІ для задач ультразвукової витратометрії (визначення координат розташування (x) та вагових коефіцієнтів АК (w) в залежності від значення (N) , нами удосконалено алгоритм проектування багатоканальних хордових УЗВ на базі ЧМІ.

Розглянемо детально етапи цього алгоритму:

1. Вибрати кількість хордових АК УЗВ (ввід значення змінної N з діапазону від 2 до 6).
2. Вибрати ЧМІ (ввід значення змінної M):

2.1. Якщо вибрано ЧМІ Гауса-Чебишева, ЧМІ Гауса-Лежандра, ЧМІ Гарріса-Еванса чи метод OWICS, то значення x та w обираємо звернувшись до даних математичного довідника [9] та наукової праці [6], де вони вже розраховані і зведені у таблиці. В табл.1 наведено конкретні значення x та w за цими ЧМІ для УЗВ з $N = 2, 3, 4, 5$ та 6. Для ЧМІ Гарріса-Еванса дані при $N = 6$ відсутні.

2.2. Якщо вибрано ЧМІ Гауса-Якобі, то далі необхідно:

2.2.1. Вибрати степінь вагової функції ортогонального поліному Якобі (вибір значення k з діапазону від -1 до 1 [5, 9]).

2.2.2. Побудувати рекурентне рівняння поліному Якобі за спрощеною формулою (2), в якій «рідні» коефіцієнти α та β [7] замінені на k [5, 7, 9]:

$$\begin{cases} p_{j+1} = \frac{e_j}{c_j} x p_j - \frac{f_j}{c_j} p_{j-1}; (p_{j-1} \equiv 0, p_0 \equiv 1) \\ c_j = (j + 1)(j + 2k + 1) \\ e_j = (2j + 2k + 1)(j + k + 1) \\ f_j = (j + k)(j + k + 1) \\ j = 0, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (2)$$

До прикладу, нами побудовано рекурентні рівняння полінома Якобі згідно формули (2) для $k = 0,5$ при кількості АК $N = 1, 2, 3, 4, 5$ та 6. Ось ці рівняння:

$$\begin{aligned} p_1 &= 3x/2 \\ p_2 &= 5x^2/2 - 5/8 \\ p_3 &= 35x^3/8 - 35x/16 \\ p_4 &= 63x^4/8 - 189x^2/32 + 63/128 \\ p_5 &= 231x^5/16 - 231x^3/16 + 693x/256 \\ p_6 &= 429x^6/16 - 2145x^4/64 + 1287x^2/128 - 429/1024 \end{aligned}$$

Для розрахунку застосовано розроблену нами програму в середовищі MATLAB, блок-схема алгоритму якої зображена на рис.3. Адекватність отриманих результатів перевірено методом порівняння з рівняннями p_1, p_2, p_3, p_4 , що наведені в науковій праці [5].

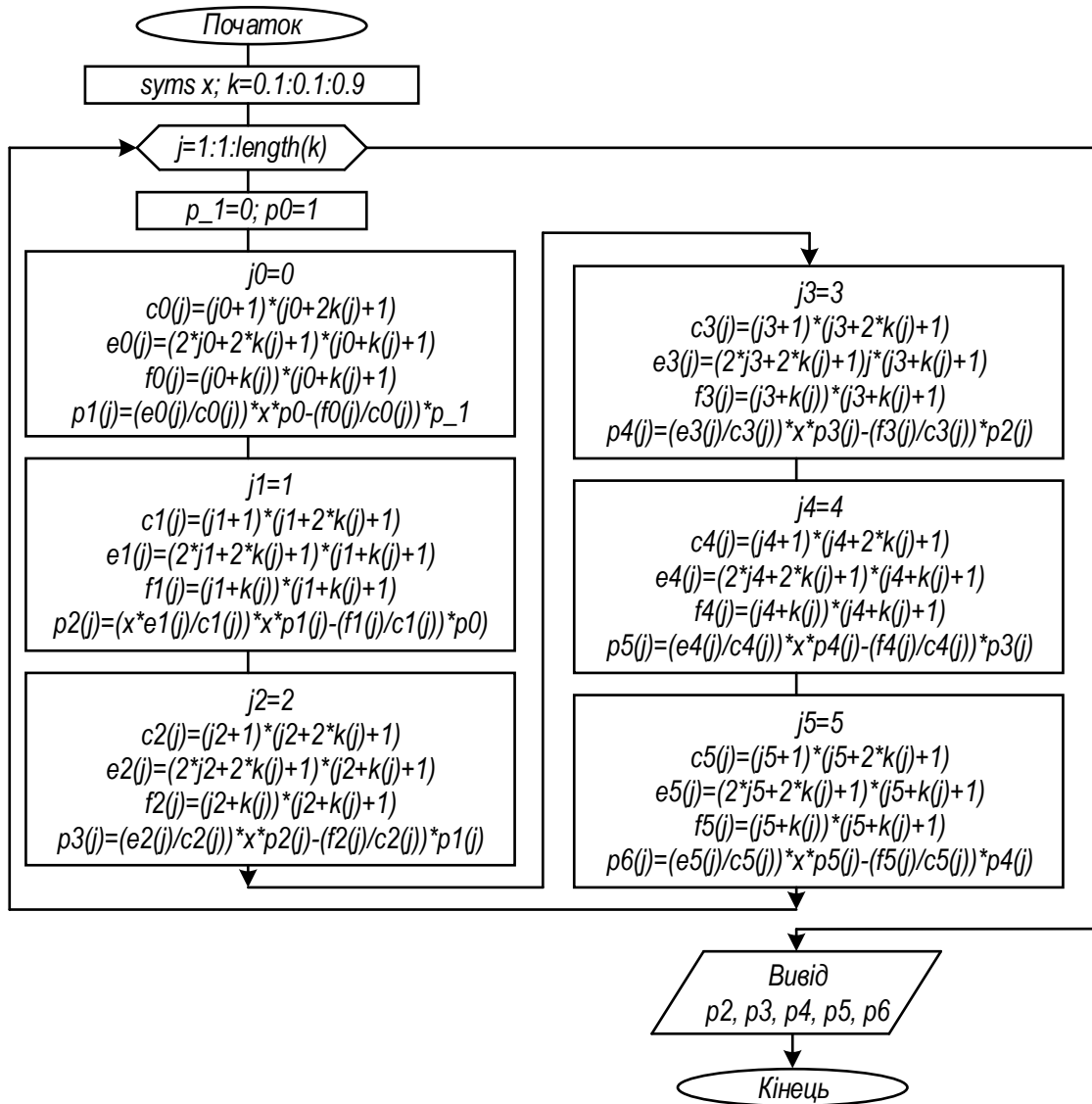


Рисунок 3 – Блок-схема програми для побудови рекурентних рівнянь полінома Якобі згідно формули (2) при $k = 0, 1 \dots 0,9$ та $N = 2 \dots 6$

2.2.3. Знайти корені поліному Якобі любим доступним методом [9], які й будуть значеннями координат розташування АК УЗВ.

До прикладу, нами знайдено корені виведених в п.2.2.2 поліномів Якобі із застосуванням функції *roots* середовища MATLAB:

$$x(N = 2): 0,5; -0,5$$

$$x(N = 3): 0; 0,7071; -0,7071$$

$$x(N = 4): -0,8090; 0,8090; -0,30901; 0,30901$$

$$x(N = 5): 0; -0,8660; -0,5; 0,8660; 0,5$$

$$x(N = 6): -0,9009; 0,9009; -0,6234; 0,6234; -0,2225; 0,2225$$

Адекватність отриманих результатів перевірено методом порівняння з даними, що наведені в наукових працях [5-7].

2.2.4. Розрахувати вагові коефіцієнти АК УЗВ за формулою (3) [5-7]:

$$w_j = \frac{1}{w(x_j)} \int_{-1}^1 W(x) PL_j(x) dx; \quad (j = 1, 2, \dots N), \quad (3)$$

де $W(x) = (1 - x^2)^k$ – вагова функція поліному Якобі; $PL_j(x)$ – поліном Лагранжа виду [5, 9]:

$$PL_j(x) = \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq j}}^N \frac{x-x_j}{x_j-x_k}$$

До прикладу, нами розраховано значення вагових коефіцієнтів (w) для $k = 0,5$ та координат розташування, отриманих в п.2.2.3.

$w(N = 2)$: 0,9069; 0,9069

$w(N = 3)$: 0,7854; 0,5554; 0,5554

$w(N = 4)$: 0,3693; 0,3693; 0,5976; 0,5976

$w(N = 5)$: 0,5236; 0,2618; 0,4534; 0,2618; 0,4534

$w(N = 6)$: 0,1947; 0,1947; 0,3509; 0,3509; 0,4375; 0,4375

Для розрахунку застосовано розроблену нами програму в середовищі MATLAB. Адекватність отриманих результатів перевірено методом порівняння зі значеннями в [5, 9].

Таблиця 1. Координати розташування та вагові коефіцієнти АК УЗВ

N	ЧМІ Гауса-Чебишева [9, табл.25.5]		ЧМІ Гауса-Лежандра [9, табл.25.4]		ЧМІ Гарріса-Еванса [6]		OWICS [5]	
	x	w	x	w	x	w	x	w
2	±0,5773	1	±0,5773	1	±0,4782	0,8695	±0,4879	0,8908
3	±0,7071	2/3	±0,7745	0,5555	±0,7794	0,5035	±0,6956	0,5537
	0	2/3	0	0,8888	0	0,9304	0	0,7687
4	±0,7946	0,5	±0,8611	0,3478	±0,8893	0,2273	±0,7996	0,3719
	±0,1875	0,5	±0,3399	0,6521	±0,4067	0,7441	±0,3038	0,5882
5	±0,8325	0,4	±0,9062	0,2369	±0,9474	0,1243	±0,8585	0,2654
	±0,3745	0,4	±0,5385	0,4786	±0,6860	0,4657	±0,4932	0,4489
	0	0,4	0	0,5689	0	0,8112	0	0,5158
6	±0,8662	0,33	±0,9325	0,1713	-	-	±0,8949	0,1984
	±0,4225	0,33	±0,6612	0,3601	-	-	±0,6167	0,3489
	±0,2666	0,33	±0,2386	0,4680	-	-	±0,2197	0,4322

З метою удосконалення алгоритму, а саме етапів 2.2.2-2.2.4, в роботі [10] авторами отримано масиви значень x та w при $N = 2, 3$ та 4 для діапазону значень $k = 0,1 \dots 0,9$. Шляхом апроксимації цих масивів поліномами різного ступеня, авторам отримано відповідні аналітичні залежності $x = f(k)$ та $w = f(k)$. Використовуючи подібний підхід, нами в даній роботі розроблено аналітичні залежності для $N = 5$ та 6 в діапазоні значень $k = 0,1 \dots 0,9$:

$N = 5$:

$$x_{1,5} = 0,0084k^2 - 0,0842k + 0,906$$

$$x_{2,4} = 0,0124k^2 - 0,0809k + 0,537$$

$$x_3 = 0$$

$$w_{1,5} = -0,0153k^2 + 0,0528k + 0,2392$$

$$w_{2,4} = 0,0057k^2 - 0,052k + 0,478$$

$$w_3 = 0,0158k^2 - 0,0955k + 0,5674$$

$N = 6$:

$$x_{1,6} = 0,0061k^2 - 0,0670k + 0,933$$

$$x_{2,5} = 0,0107k^2 - 0,0796k + 0,661$$

$$x_{3,4} = 0,0045k^2 - 0,0332k + 0,238$$

$$w_{1,6} = -0,0126k^2 + 0,0506k + 0,1726$$

$$w_{2,5} = 0,0010k^2 - 0,0210k + 0,3611$$

$$w_{3,4} = 0,0088k^2 - 0,0633k + 0,467$$

На базі цього удосконалено алгоритм проектування багатоканальних хордових УЗВ, а також на базі аналізу існуючих програмних продуктів в галузі ультразвукової витратометрії, викладених в роботі [2], нами розроблено комп'ютерну програму для проектування багатоканальних хордових УЗВ. Для цього використано безкоштовне середовище розробки Visual Studio Community 2019 та мову програмування C#. Отримана програма отримала назву AutoDesignUSM, а інструкція для роботи з нею в консольному режимі спілкування складається з наступних кроків:

Крок 1. Програма просить користувача ввести значення внутрішнього радіус ВТ (r) в міліметрах «Enter the internal radius of the measuring pipeline (r) in mm:». Введені значення з клавіатури зчитується функцією Console.ReadLine(), і присвоюється змінній r типу double з використанням функції Double.Parse(). У тому випадку, якщо введені значення радіуса виявляться від'ємним або рівним нулю, то програма виведе на екран попереджувальне повідомлення «Wrong! The value of the internal radius is negative or zero. Enter the correct value». Поки користувач не введе

коректне значення, алгоритм не буде виконуватись. Дана перевірка реалізується із застосуванням операторів `if` та `goto`.

Крок 2. Програма просить користувача ввести значення, що відповідає кількості АК УЗВ (N): «Enter the number of acoustic paths USM ($N = 2, 3, 4, 5$ or 6):». Введене значення з клавіатури зчитується функцією `Console.ReadLine()`, і присвоюється змінній N типу `int` з використанням функції `Int32.Parse()`. У тому випадку, якщо введене значення виявиться меншим за 2 або більшим за 6, то програма виведе на екран попереджувальне повідомлення «Wrong! Enter the correct number of acoustic paths». Поки користувач не введе коректне значення, алгоритм не буде виконуватись. Дана перевірка реалізується із застосуванням операторів `if` та `goto`.

Крок 3. Програма просить користувача ввести ціле число, яке відповідає типу ЧМІ (M): «Choose a NMI (enter the number): 1 – Gauss-Legendre; 2 – Gauss-Chebyshev; 3 – Gauss-Jacobi; 4 – Harris-Evans; 5 – OWICS». Введене значення з клавіатури зчитується функцією `Console.ReadLine()`, і присвоюється змінній M типу `int` з використанням функції `Int32.Parse()`. У тому випадку, якщо введене значення виявиться меншим за 1 або більшим за 5, то програма виведе на екран попереджувальне повідомлення «Wrong! Enter the number of the available method». Поки користувач не введе коректне значення, алгоритм не буде виконуватись. Дана перевірка реалізується із застосуванням операторів `if` та `goto`.

Крок 4. Якщо користувач обрав ЧМІ Гауса-Якобі, тобто змінна $M = 3$, програма просить ввести значення k : «Since you have chosen a Gauss-Jacobi NMI, you need to enter the degree of weight function polynomial Jacobi (k) from the range of $0,1...0,9$:». Введене значення з клавіатури зчитується функцією `Console.ReadLine()`, і присвоюється змінній k типу `double` з використанням функції `Double.Parse()`.

Крок 5. На екрані з'являються результати, представлені на рис.4. Серед них можна побачити:

- 1) масив значень відносних координат розташування АК УЗВ x ;
- 2) масив значень реальних координат розташування АК УЗВ X ;
- 3) масив значень вагових коефіцієнтів АК УЗВ w .

```
r: 100 mm
N: 2
NIM: Gauss-Legendre
x: 0,5774 -0,5774
X: 57,7400 -57,7400 (mm)
w: 1,0000 1,0000

To repeat - enter 1. To exit - enter 0 and then any key:
```

Рисунок 4 – Вікно виводу програми AutoDesignUSM

Крок 6. Програма пропонує користувачу зробити вибір – повторення попередніх кроків, чи закінчення роботи і вихід з програми: «To repeat – enter 1. To exit – enter 0 and then any key:». Повторення реалізується із застосуванням оператора `goto`, а вихід – за допомогою функції `Console.ReadKey()`. Якщо користувач вибере третій варіант (введе значення відмінне від 1 та 0), то програма виведе повідомлення «Wrong! Enter the correct value». Поки користувач не введе коректне значення, алгоритм не буде виконуватись.

Блок-схема алгоритму розробленої програми AutoDesignUSM наведено на рис.5. У тому випадку, якщо користувач увів r та N , і обрав $M = 1, 2, 4$ та 5 , значення координат розташування (x) та вагових коефіцієнтів (w) АК УЗВ отримуємо за даними з таблиці 1.1. Значення реальних координат розташування (X) АК УЗВ при цьому, отримуємо множенням x на внутрішній радіус (r) вимірювального трубопроводу. Для складнішого випадку, коли значення $M = 3$ (відповідає ЧМІ Гауса-Якобі), і де користувач додатково повинен ввести значення k , значення x та w отримано за відповідними аналітичними залежностями $x = f(k)$ та $w = f(k)$ [10], деякі з яких розроблено та представлено нами в цій роботі (для N рівне 5 та 6). Опісля, значення X так само отримуємо множенням x на радіус r . Переключення між методами відбувається за допомогою оператора-перемикача `switch case`.

На рис.6 зображено вікно програми AutoDesignUSM в режимі «запиту».

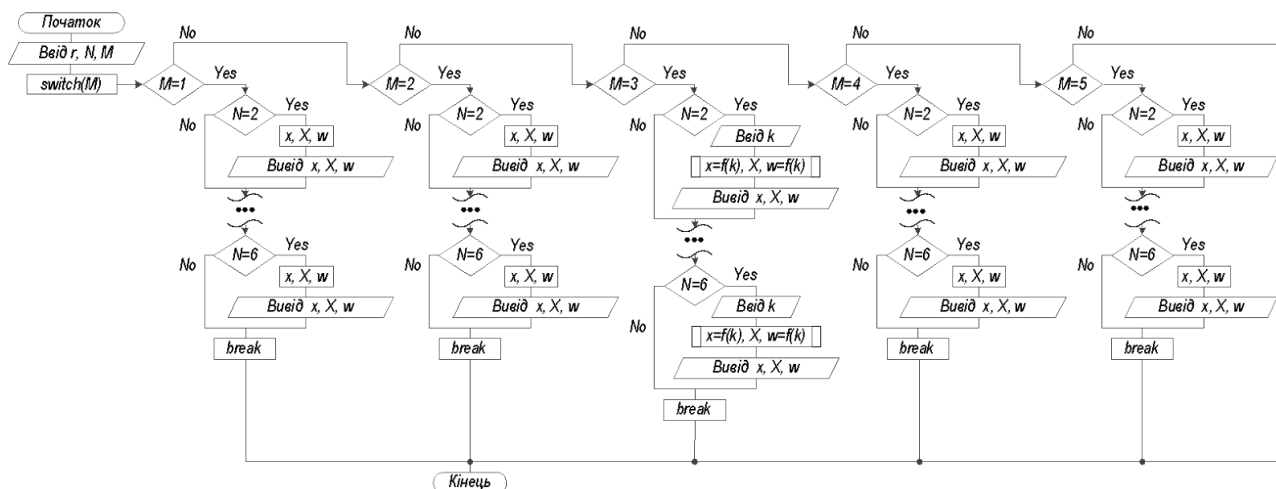


Рисунок 5 – Спрощена блок-схема «логіки» програми AutoDesignUSM

```

*****
*                               *
*           AutoDesignUSM       *
* * The program for calculating the coordinates of the location (x) *
* * and the weighing coefficients (w) of the acoustic paths of *
* * chordal ultrasonic flow meters (USM). Out of user choice, *
* * the calculation is performed by one of the numerical *
* * integration method (NIM) - Gauss-Legendre, Gauss-Chebyshev, *
* * Gauss-Jacobi, Harris-Evans and OWICS. *
* *                               *
* ----- *
* * Lviv Polytechnic National University, 2023 *
* *                               *
*****

1. Enter the internal radius of the measuring pipeline (r) in mm: 100

2. Enter the number of acoustic paths USM (N = 2, 3, 4, 5 or 6): 2

3. Choose a NIM (enter the number):
    1 - Gauss-Legendre
    2 - Gauss-Chebyshev
    3 - Gauss-Jacobi
    4 - Harris-Evans
    5 - OWICS
    3
    
```

Рисунок 6 – Вікно програми AutoDesignUSM в режимі конкретного «запиту»

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Опісля проведеного аналіз науково-технічної літератури за темою роботи, авторами запропоновано удосконалити класифікацію методів проектування багатоканальних хордових УЗВ, що дозволяє виокремити ЧМІ, які найчастіше використовують для розрахунку параметрів рівняння об'ємної витрати витратомірів даного типу. Також авторами, шляхом розробки нових аналітичних залежностей $x = f(k)$ та $w = f(k)$ для 5-ти та 6-ти каналних УЗВ, удосконалено алгоритм проектування витратомірів на базі ЧМІ. Даний алгоритм реалізовано в удосконаленій комп'ютерній програмі, яка в консольному режимі розраховує значення координат розташування (x) та вагових коефіцієнтів (w) АК для проектування багатоканальних УЗВ. Для роботи з програмою розроблено інструкцію користувача.

Перспективою подальших досліджень є розробка візуального інтерфейсу користувача та розширення функціоналу програми AutoDesignUSM – автоматизований розрахунок теоретичного калібрувального коефіцієнта УЗВ обраного типу та конструкції (одно- та багатоканальні).

Список бібліографічного опису

1. International Organization for Standardization. (2010). ISO 17089-1: Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. Geneva, Switzerland: ISO.
2. Roman, V., Matiko, F., and Kutsan, A. (2022). Software for calculating the location coordinates and weighting coefficients of acoustic paths of ultrasonic flow meters. Journal of Energy Engineering and Control Systems, 8(2), 98-103. <https://doi.org/10.23939/jeecs2022.02.098>
3. Роман, В., та Ілючок, В. (2023). Удосконалення комп'ютерної програми для розрахунку координат розташування та вагових коефіцієнтів акустичних каналів ультразвукових витратомірів. КОМП'ЮТЕРНО-

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО, (50), 157-162. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-24>

4. International Electrotechnical Commission. (1991). CEI/IEC 60041: Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines. Storage, pumps and pump turbines.
5. Tresch, T., Gruber, P., and Staubli, T. (2006, July 30 – August 1). Comparison of integration methods for multipath acoustic discharge measurements. Paper presented at the Proceedings of VI International Conference on IGHEM, Portland Oregon, USA. <https://www.ighem.org/Paper2006/d6.pdf>
6. Pannel, C.N., Evans, C.N., and Jackson, D.A. (1990). A new integration technique for flowmeters with chordal paths. Flow Measurement Instrumentation, 1, 216-224. [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(90\)90016-Z](https://doi.org/10.1016/0955-5986(90)90016-Z)
7. Voser, A. (1999). Analysis and error optimization of multipath strength acoustic flow measurement in water turbines. Unpublished master's doctoral dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, Switzerland.
8. Lynnworth, A.M. and Lynnworth, L.C. (1985). Calculated Turbulent-Flow Meter Factors for Nondiametral Paths Used in Ultrasonic Flowmeters. J. Fluids Eng. Mar, 107(1), 44-48.
9. Abramovitz, M., and Stegun, I. (1964). Handbook of mathematical function. New York, NY: NBS.
10. Роман, В., та Іжик, А. (2021). Аналітичні залежності розрахунку координат розташування та вагових коефіцієнтів акустичних каналів ультразвукових витратомірів. КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО, (43), 122-128. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2021-43-20>

References

1. International Organization for Standardization. (2010). ISO 17089-1: Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas. Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement. Geneva, Switzerland: ISO.
2. Roman, V., Matiko, F., and Kutsan, A. (2022). Software for calculating the location coordinates and weighting coefficients of acoustic paths of ultrasonic flow meters. Journal of Energy Engineering and Control Systems, 8(2), 98-103. <https://doi.org/10.23939/jeecs2022.02.098>
3. Roman, V., and Iliuchok, V. (2023). Improving of the software for calculating the location coordinates and weighting coefficients of acoustic paths of ultrasonic flow meters. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION, (50), 157-162. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-24> (Ukrainian)
4. International Electrotechnical Commission. (1991). CEI/IEC 60041: Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines. Storage, pumps and pump turbines.
5. Tresch, T., Gruber, P., and Staubli, T. (2006, July 30 – August 1). Comparison of integration methods for multipath acoustic discharge measurements. Paper presented at the Proceedings of VI International Conference on IGHEM, Portland Oregon, USA. <https://www.ighem.org/Paper2006/d6.pdf>
6. Pannel, C.N., Evans, C.N., and Jackson, D.A. (1990). A new integration technique for flowmeters with chordal paths. Flow Measurement Instrumentation, 1, 216-224. [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(90\)90016-Z](https://doi.org/10.1016/0955-5986(90)90016-Z)
7. Voser, A. (1999). Analysis and error optimization of multipath strength acoustic flow measurement in water turbines. Unpublished master's doctoral dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Zurich, Switzerland.
8. Lynnworth, A.M. and Lynnworth, L.C. (1985). Calculated Turbulent-Flow Meter Factors for Nondiametral Paths Used in Ultrasonic Flowmeters. J. Fluids Eng. Mar, 107(1), 44-48.
9. Abramovitz, M., and Stegun, I. (1964). Handbook of mathematical function. New York, NY: NBS.
10. Roman, V., and Izhik, A. (2021). Analytical dependences of calculation of location coordinates and weight coefficients of acoustic paths of ultrasonic flowmeters. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION, (43), 122-128. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2021-43-20> (Ukrainian)

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-04>

УДК 62-503.56:621.717

Чибіряк Яна Іванівна, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-0634-7609>

Захарова Анна Миколаївна, студентка,

<https://orcid.org/0000-0001-5242-4065>

Лавров Євгеній Анатолійович, д.т.н., професор,

<https://orcid.org/0000-0001-9117-5727>

Великодний Дмитро Володимирович, к.ф.-м.н.,

<https://orcid.org/0000-0003-0044-5619>

Боровик Валентина Олександрівна, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-3668-6302>

Сумський державний університет, м. Суми, Україна

МОДЕЛІ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПОШУКУ РАЦІОНАЛЬНИХ ВАРІАНТІВ КОМПУНУВАННЯ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ

Чибіряк Я. І., Захарова А. М., Лавров С. А., Великодний Д. В., Боровик В. О. **Моделі для автоматизованого пошуку раціональних варіантів компонування виробів машинобудування.** У даній роботі вирішено задачу моделювання раціональних варіантів компонування виробів машинобудування. Запропоновані математичні моделі дозволяють формалізувати поставлену задачу, враховують структуру і технологічні закономірності виробів, що впливають на послідовність складання. Завдяки математичним моделям, побудованим на основі ситуативного моделювання, теорії матриць, графів забезпечується можливість компактного зберігання і зручного оперування вхідними даними у поєднанні з математичною сумісністю поставленої задачі синтезу варіантів складання. В основу методу, представленого в роботі, покладено правила ранжування, що враховують конструкторські та технологічні особливості складального процесу. Перевага методу полягає в тому, що здійснюється пошук варіантів складання, раціональних по часовій тривалості. Це досягається завдяки оптимальному поділу структури виробу на незалежні складальні одиниці, що можуть збиратися одночасно, мінімізації кількості складальних позицій та паралельній реалізації складальних операцій. На основі методу розроблено алгоритм, спрямований на комп'ютерну реалізацію автоматизованого пошуку раціональних варіантів компонування виробів машинобудування.

Ключові слова: послідовність складання, виріб, матриця базування, матриця доступу, матриця екологічних обмежень, матриця розмірних зв'язків, структура виробу.

Chybyriak Y. I., Zakharova A. M., Lavrov E. A., Velykodnyi D. V., Borovyk V. O. **Models for automated search for rational assembly options for mechanical engineering products.** This paper solves the problem of modeling rational assembly options for mechanical engineering products. The proposed mathematical models allow us to formalize the task at hand, taking into account the structure and technological patterns of products that affect the assembly sequence. Thanks to mathematical models built based on situational modeling, matrix theory, and graphs, the possibility of compact storage and convenient operation of input data is provided, combined with the mathematical compatibility of synthesizing assembly options. The method presented in this paper is based on ranking rules that consider the design and technological features of the assembly process. The advantage of this method is that it searches for assembly options that are rational in terms of time duration. This is achieved by optimally dividing the product structure into independent assembly units that can be assembled simultaneously, minimizing the number of assembly positions, and implementing assembly operations in parallel. Based on this method, an algorithm is developed aimed at computer implementation of automated search for rational assembly options for mechanical engineering products.

Keywords: assembly sequence, product, base matrix, access matrix, environmental constraint matrix, dimensional relationship matrix, product structure.

Вступ. В умовах 4-ї промислової революції суттєво підвищуються вимоги до якості автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва [1-3]. Останні роки пов'язані з бумом досліджень, присвячених моделюванню процесів виробництва і впровадженню інтелектуальних технологій [4, 5] та систем гібридного інтелекту [6]. Не дивлячись на велику кількість досліджень, задача вибору оптимальної структури та організації роботи технологічних систем вирішена не до кінця. Особливо гостро постає проблема вирішення задачі оптимізації процесів складання. Раціональний синтез послідовності складання виробів з урахуванням нових викликів промислової революції, в тому числі екологічних і безпекових, є однією з найбільш актуальних задач для автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва.

Визначення послідовності зборки відноситься до багатоваріантної задачі. Від обраного варіанту залежать такі показники як якість, собівартість, продуктивність виготовлення, тривалість технологічного процесу. Дана задача є слабо структурованою та відноситься до класу задач, що важко піддаються формалізації. Відомо, що автоматизація технологічних процесів лежить в основі підвищення якості продукції, тому важливо проектувати таку послідовність складання, яка в процесі реалізації передбачає можливість використання засобів автоматизації.

Моделювання є ефективним інструментом пошуку раціональних і найменш витратних способів вирішення складних багатоваріантних задач [7, 8]. У результаті моделювання процесів у автоматизованих людино-машинних системах ми отримуємо інформацію, потрібну для прийняття рішень в умовах невизначеності [9, 10]. Для автоматизованої системи технологічної підготовки виробництва необхідні нові математичні моделі структури виробу, технологічного процесу та впливу виробництва на навколишнє середовище, що визначають умови вирішення задачі раціонального складання.

Аналіз існуючих досліджень та публікацій. Складання є заключним етапом виготовлення, тому від даного етапу залежить якість готової продукції. Обсяг складальних робіт у машинобудуванні становить 20-40% від загальної трудомісткості виготовлення, у приладобудуванні цей показник є вищим – до 40-70%. Така ситуація пояснюється відсутністю впровадження новітніх розробок та інформаційних технологій, відсутністю програмного забезпечення високої надійності, несумісністю засобів обчислювальної техніки [11, 12]. Тому саме у складальному виробництві спостерігається низький рівень механізації та автоматизації.

Виробнича практика підтверджує, що скорочення технологічного процесу складання по тривалості впливає на зниження трудомісткості та собівартості виробів. Щоб цього досягти необхідно врахувати цілий комплекс факторів технологічного процесу [15, 16]. Порівняно з механообробним виробництвом, у машинобудуванні складальні процеси почали удосконалювати значно пізніше. Це було зумовлено такими факторами: можливістю вручну зібрати виріб та складністю автоматизації складальних операцій. Складальні автоматизовані комплекси є недешевими у використанні та потребують багато часу на виробництво. Водночас для виробів, що випускаються, спостерігається скорочення життєвого циклу. В таких умовах складальне обладнання зазнає більш швидкого морального старіння у порівнянні з їх фізичним зношенням [17, 18]. Тому виникає потреба створювати гнучкі складальні системи, що здатні переналагоджуватися в міру зміни виробів, що випускаються. Такі складальні системи є дорогими у придбанні і використанні, також технічні засоби для їх реалізації у промисловості поки що відсутні. Тому переважає ручне виконання більшості складальних операцій із залученням спеціалістів, робота яких відрізняється монотонністю, одноманітністю та низькою ефективністю. Як наслідок, готові вироби мають низьку якість виготовлення [19].

Час і якість проектування технологічних процесів складання багато в чому пов'язані з використанням обчислювальної техніки, що потребує формалізованого опису технологічного процесу. Необхідно виявити основні закономірності протікання технологічного процесу складання та виконати їх математичний опис [17, 18, 20-23].

Забруднення навколишнього середовища є сучасною проблемою, яка постає перед машинобудівною галуззю. Мінімізація шкідливого впливу на середовище та стан людей, задіяних у виробництві, є актуальною задачею, яка повинна вирішуватися за рахунок розробки і впровадження нових методів та технологій [10, 15-18]. Для складального виробництва до екологічно небезпечних відносять операції, які супроводжуються шумом, вібраціями, підвищеними температурами, радіацією, використанням токсичних матеріалів (клеїв, фарб). Це операції з'єднання з натягом, склеювання, спаювання, зварювання та інші. Врахування впливу на екологію та безпеку робочого процесу є важливим фактором підвищення техніко-економічних показників складального виробництва. На жаль, під час розробки технологічних процесів складання питання екології майже не розглядаються.

В даний час існує два основних підходи проектування технологічних процесів: алгоритмічний та евристичний. Алгоритмічний метод заснований на використанні системного підходу і математичного моделювання. Проектування технології складання полягає в обробці вхідної інформації, побудові на її основі математичної моделі виробу, розробці множини оптимальних послідовностей складання у відповідності до закладеного алгоритмічного та програмного забезпечення [20, 22, 24]. Якщо виріб не складний і містить невелику кількість елементів, множину оптимальних варіантів компонування виробу можна отримати шляхом простого перебору. Для складних багатоелементних виробів зростає кількість можливих перестановок, тому навіть з використанням програмних засобів такий перебір практично неможливо реалізувати. У цьому випадку, щоб охопити усю множину варіантів складання та досягти оптимального рішення необхідно побудувати модель складального процесу, яка забезпечить цілеспрямований пошук раціонального варіанту [20-22].

На практиці для вирішення задачі побудови раціонального варіанту складання застосовують різні методи. Серед методів відомі теорія підтримки прийняття рішень, наприклад, у роботах [21, 24]. Методи машинного навчання, теорія множин, матриць, графів знайшли практичне використання в роботах [14, 19], пов'язаних з проектуванням технологічних процесів складання. Стандартні алгоритми рішення транспортної задачі використовуються при визначенні оптимальних варіантів послідовності складання у випадку багатокомпонентного виробу. Дана задача зводиться до пошуку найкоротшого шляху між вершинами графа з використанням методів лінійного та динамічного програмування [18, 21]. При цьому, вершини графа сітьової моделі відповідають деталям виробу, а ребрам графа присвоюються вагові коефіцієнти, що характеризують критерій ефективності, наприклад, тривалість складання, собівартість та ін. При автоматизованому проектуванні складальних процесів також застосовують математичні методи теорії оптимізації, ймовірності, методи обчислювальної та дискретної математики [16-20]. Ефективність використання методів оптимізації при проектуванні раціональних технологічних процесів залежить від правильного вибору критерію та цільової функції [22–24].

Таблиця 1 містить результати аналізу методів, які використовують для моделювання послідовності складання. Аналіз показав, що існує практичний досвід та виявлено закономірності процесу синтезу раціональних варіантів компонування виробів. Недолік полягає в тому, що враховано неповний комплекс факторів, необхідних для автоматизованого вирішення даної задачі.

Табл. 1. Найбільш застосовні методи для побудови варіантів складання виробів

Метод \ Враховані критерії	Динамічне програмування	Машинне навчання	Лінійне програмування	Ситуативне моделювання
Квалітети точності деталей	+	+	+	–
Техніка безпеки, екологія	–	–	–	–
Ієрархічна структура виробу	+	+	+	–
Розмірні зв'язки у виробі	–	+	–	+
Габаритні розміри та маса деталей	–	+	+	–
Зв'язки базування	+	+	+	+
Зв'язки передування	+	+	+	+

Постановка задачі .

Метою даної роботи є розробка математичних моделей та методу моделювання варіантів послідовності складання виробу з урахуванням конструкторсько-технологічних характеристик деталей та технологічних особливостей складального процесу.

Для досягнення поставленої мети у роботі визначено наступні задачі:

- виконати формалізацію складального процесу з використанням методів теорії графів, матриць;
- з використанням побудованих математичних моделей розробити метод, що дозволяє отримати множину варіантів компонування виробу;
- розробити алгоритмічне забезпечення рішення поставленої задачі.

Виклад основного матеріалу та обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Комплексна автоматизація виробництва належить до актуальних і складних наукових задач. Для автоматизації проектування складальних процесів необхідно подати математичну постановку, що забезпечить її вирішення комп'ютерними засобами.

Для визначення відповідності структури виробу виробничій системі, доцільно представити їх у вигляді математичних моделей. Структуру виробу можна представити графом Gr_v . (рис. 1), у якому вершини відповідають деталям або складальним одиницям, а ребра – зв'язкам між ними.

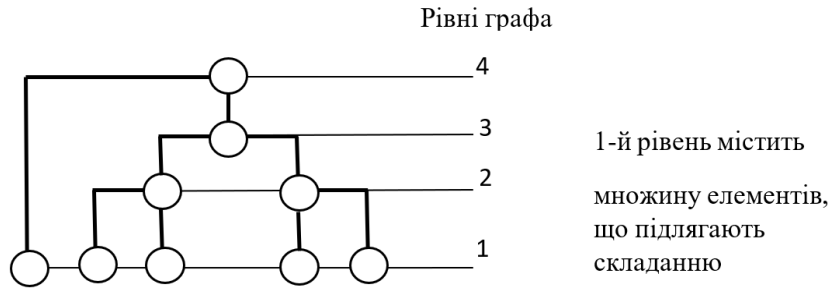


Рисунок 1 – Приклад графу $G_{Гв}$ структури виробу з п'яти деталей

Структура виробничої системи представляється графом $G_{Гв.с}$, (рис. 2), у якому вершинам відповідають операційні комплекси (ОК), а ребрам – транспортні маршрути між ними.

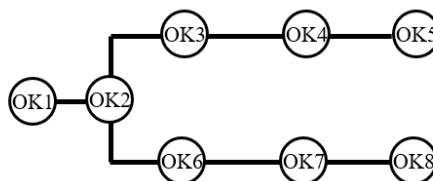


Рисунок 2 – Приклад графу $G_{Гв.с}$ структури виробничої системи з восьми операційних комплексів

Графи $G_{Гв}$ та $G_{Гв.с}$, що описують структуру виробу та виробничої системи, доцільно представити у матричному вигляді.

Матриця структури виробу:

$$Mt_{Гв} = [k \times k],$$

де k – кількість деталей у структурі виробу.

Елементи матриці $Mt_{Гв}$:

$$Mt_{Гв} [i][j] = \begin{cases} 1, \text{ якщо з'єднання } i \text{ виконується перед з'єднанням } j \\ 2, \text{ якщо з'єднання } i \text{ та } j \text{ можуть бути реалізовані одночасно} \\ 3 - \text{ у інших випадках } (i, j - \text{ порядкові номери з'єднань у виробі}) \end{cases}$$

Матриця структури виробничої системи:

$$Mt_{Гв.с} = [n \times n],$$

де n – кількість операційних комплексів (ОК) у автоматизованій виробничій системі.

Елементи матриці $Mt_{Гв.с}$:

$$Mt_{Гв.с} [i, j] = \begin{cases} 0 - \text{ між } i\text{-м та } j\text{-м ОК-ми відсутній зв'язок} \\ 1 - i\text{-й може бути використаний після } j\text{-го} \\ 2 - i\text{-й та } j\text{-й ОК-си можуть застосовуватись одночасно} \\ 3 - i\text{-й та } j\text{-й ОК-си можуть застосовуватись у довільній послідовності} \\ (i, j - \text{ порядкові номери операційних комплексів}) \end{cases}$$

Для встановлення взаємозв'язку між матрицями $Mt_{Гв}$ і $Mt_{Гв.с}$ доцільно використовувати масив операційних комплексів $Mt_{ок}$, що пов'язує складальні операції з технологічними можливостями ОК-сів.

$$Mt_{ок} = [n \times s],$$

де s – кількість складальних операцій (СО) у виробі.

Номер СО \ Номер ОК	1	2	...	n
1	1	0	...	1
2	1	1	...	0
...
s	0	0	...	1

$$M_{\text{ок}} [i][j] = \begin{cases} 1 - \text{на } j\text{-му ОК-сі може бути реалізована } i\text{-та складальна операція} \\ 0 - \text{у протилежному випадку} \end{cases}$$

Матриця з'єднань $M_{\text{з}}$ [$k \times k$] пов'язує номер складального елемента у виробі з кодом складального з'єднання і його характеристиками:

$$M_{\text{з}} [i][j] = \begin{cases} s - \text{якщо } i\text{-та і } j\text{-та деталі утворюють складальне з'єднання} \\ \quad (s - \text{код складальної операції}) \\ 0 - \text{відсутнє складальне з'єднання між } i\text{-ю і } j\text{-ю деталями} \end{cases}$$

Взаємозв'язок між складовими елементами у виробі визначається наявністю між їх поверхнями зв'язків спряження і положення. Дві деталі спрягаються по спільному контуру, якщо між ними існує зв'язок базування. Зв'язки базування поділяються на основні і допоміжні. Основний зв'язок базування має місце, якщо між деталями існує певний вид складального з'єднання. Математична модель, що відображає зв'язки базування у виробі позначимо матрицею $M_{\text{б}}$ [$k \times k$]:

$$M_{\text{б}} [i][j] = \begin{cases} 1 - \text{якщо між } i\text{-ю і } j\text{-ю деталями існує основний зв'язок базування} \\ 0 - \text{відсутній зв'язок базування між } i\text{-ю і } j\text{-ю деталями} \end{cases}$$

Орієнтація одних деталей відносно інших визначається не лише наявністю контактів між поверхнями, а й розмірними зв'язками – діаметральними, радіальними, кутовими, лінійними. Розміри складального розмірного ланцюга, реалізуються у послідовності, що визначається порядком входження деталей у виріб, які утворюють цей ланцюг.

Наявність розмірних зв'язків у виробі представимо матрицею $M_{\text{рзв.}}$ [$k \times k$], елементи якої:

$$M_{\text{рзв.}} [i][j] = \begin{cases} 1 - \text{якщо поверхні } i\text{-ї і } j\text{-ї деталей утворюють складову ланку розмірного ланцюга} \\ r - \text{якщо поверхні } i\text{-ї і } j\text{-ї деталей утворюють замикаючу ланку розмірного ланцюга} \end{cases}$$

Змінна r – ціле число, що набуває різних значень залежно від способу досягнення точності компенсуючої ланки складального розмірного ланцюга.

На послідовність компонування виробу впливають зв'язки передування між деталями, які визначають взаємне обмеження доступу під час складання, зумовлене конструкцією виробу та обладнанням, що застосовується. Такі обмеження можна описати матрицею доступу.

Елементи матриці доступу $M_{\text{д}}$ [$s \times s$] задають порядок виконання складальних операцій:

$$M_{\text{д}} [i][j] = \begin{cases} 1 - \text{якщо } i\text{-та складальна операція виконується перед } j\text{-ю} \\ 0 - i\text{-та і } j\text{-та складальні операції не мають строгої послідовності виконання} \end{cases}$$

Якщо у виробі присутні екологічно небезпечні операції, виконання яких супроводжуються вібрацією, шумом, підвищенням температури (зварювання, склеювання, спаювання) їх необхідно проводити на окремих робочих дільницях з дотриманням санітарних норм та вимог техніки безпеки. Для врахування даного фактору під час реалізації складання виробу, екологічно несприятливі операції слід відокремлювати у окремі складальні одиниці.

Екологічні фактори складального процесу доцільно представити матрицею екологічних обмежень $M_{\text{е}}$ [$s \times s$]:

$$M_{\text{е}} [i][j] = \begin{cases} 1 - i\text{-та складальна операція є екологічно несприятливою} \\ 0 - \text{у протилежному випадку} \end{cases}$$

Опис структури виробу та його конструкторсько-технологічних ознак у матричній формі надають можливість у математичному вигляді формалізувати задачу визначення послідовності складання, також матриці є зручними для зберігання інформації в оперативній пам'яті комп'ютера. Дану формалізацію покладено в основу розробки методу побудови раціональної послідовності складання та його програмної реалізації.

Побудова варіантів складання здійснюється з використанням розроблених математичних моделей.

На 1-му етапі відбувається поділ виробу на окремі складальні одиниці. За матрицею доступу $M_d [s \times s]$ визначаються номери деталей, які можуть виступати як базові в конструкції виробу. За схемою базування $M_b [k \times k]$ до кожної базової деталі добирається множина базованих елементів. У результаті маємо набір графів $G_{b_i} (i=1 \div m)$, що визначають максимальний поділ виробу на окремі складальні вузли (m – кількість складальних вузлів, на яку поділено виріб) (рис. 3).

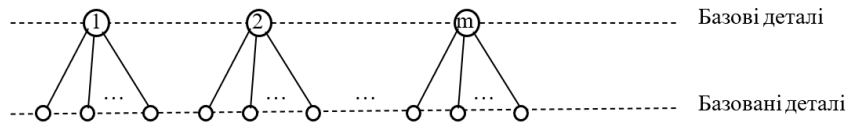


Рисунок 3 – Поділ виробу на m складальних вузлів

На 2-му етапі серед множини графів $G_{b_i} (i=1 \div m)$ визначаються графи зі спільними вершинами. Такі графи групуються у залежні графи. В кожній залежній групі проводиться ранжування графів з присвоєнням їм математичного рангу, який визначає порядок входження складальних одиниць до виробу. Ранжування проводиться у 5 кроків, в його основу покладено технологічні правила зборки.

1-й крок ранжування полягає у розрахунку ступеню зв'язності графів за співвідношенням:

$$C_{зв,i} = \sum_{j=1}^{n_i} (k_j - 1),$$

де n_i – кількість вершин i -го графу;

k_j – кількість графів, що містять j -ту вершину.

Якщо після 1-го кроку отримано графи однакового рангу проводиться 2-й крок ранжування – за складністю будови. Граф, що містить більшу кількість елементів отримує менший ранг.

3-й крок ранжування: граф, що містить більшу кількість розмірних ланок отримує менший ранг (визначається за матрицею розмірних зв'язків $M_{r_{зв}} [k \times k]$).

4-й крок ранжування: за масою базових деталей. Граф з більшою масою кореневої вершини має менший ранг.

5-й крок ранжування: за габаритними розмірами базових деталей. Граф, що містить кореневу вершину з більшим габаритним розміром має менший ранг.

У кожній групі залежних графів останній ранг присвоюється складальній одиниці, яка містить замикаючу розмірну ланку (визначається за матрицею розмірних зв'язків $M_{r_{зв}} [k \times k]$). На практиці це забезпечує реалізацію замикаючої ланки в останню чергу для забезпечення потрібної точності розмірного ланцюга.

На наступному етапі визначається послідовність складання деталей в кожній складальній одиниці. За матрицею доступу з'єднань $M_d [s \times s]$ складальні елементи розташовуються відносно базової вершини на відповідних рівнях ієрархії з утворенням груп вершин по горизонталі і по вертикалі (рис. 4).

Групи деталей по вертикалі можуть бути зібрані з однієї складальної позиції. Оскільки групи не містять спільних деталей, тобто незалежні між собою, послідовність їх реалізації визначається ранжуванням.

Покрокове ранжування має наступне математичне формулювання. 1-й крок ранжування проводиться з використанням матриці розмірних зв'язків $M_{r_{зв}} [k \times k]$.

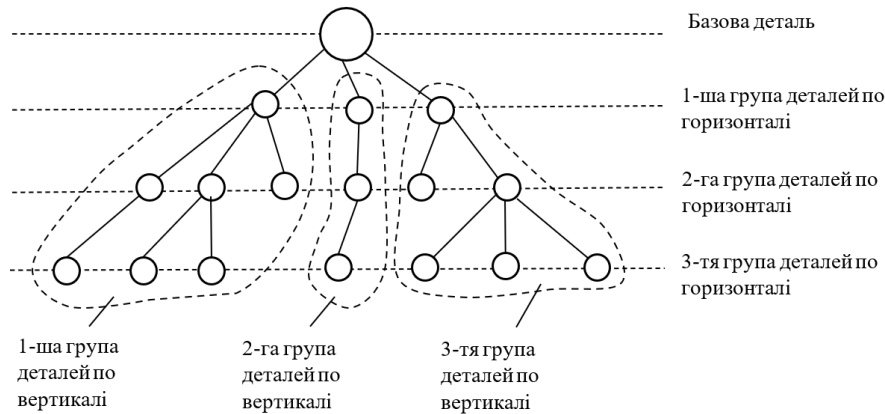


Рисунок 4 – Формування груп деталей по горизонталі та по вертикалі

Визначається кількість розмірних зв'язків, що входять до складу кожної групи по вертикалі. Група, що містить більшу кількість розмірних ланок має менший ранг.

2-й крок ранжування – за кількістю деталей, що мають вищі квалітети точності. Групі, що містить більшу кількість точних деталей присвоюється менший ранг.

На 3-му кроці ранжування за матрицею екологічних обмежень $M_{te} [s \times s]$ у групах по вертикалі виявляються екологічно несприятливі операції. Таким групам присвоюється останній ранг, незалежно від попередніх результатів ранжування. Це дозволяє відокремити небезпечні операції від інших і в подальшому виконувати їх на окремо обладнаних дільницях у кінці технологічного процесу.

Фізичний зміст ранжування полягає у мінімізації складальних позицій та у визначенні позиції, з якої слід почати процес складання. У результаті проведеного ранжування, групам по вертикалі присвоюється порядковий номер, що визначає послідовність їх реалізації. Групи деталей, що отримали однаковий ранг можуть бути зібрані у довільній послідовності. Якщо дозволяє структура виробничої системи, з метою скорочення тривалості технологічного процесу, завжди розглядається можливість їх паралельної реалізації.

Наступний етап полягає у отриманні множини варіантів складання. Нехай після декомпозиції структури виробу та після проведених етапів ранжування отримано k груп залежних графів з кількістю рангів у кожній групі, рівній r_i ($i = 1, \dots, k$). Кожен граф позначає окрему складальну одиницю. Для формування 1-го варіанту складання виробу у кожній i -й групі у якості ведучих обираються графи 1-го рангу, з яких починається процес збирання.

Для формування 2-го варіанту складання у 1-й залежній групі у якості ведучої обирається складальна одиниця, якій присвоєно 2-й ранг. При цьому у 2, 3, ..., k -й групах ведучими залишаються графи 1-го рангу.

Після перебору усіх рангів у 1-й групі графів, виконується перебір ведучих графів 2-ї групи і так до останньої k -ї групи включно.

Таким чином, загальну кількість варіантів складання виробу можна записати через добуток:

$$K = \prod_{i=1}^k r_i,$$

де k – кількість груп залежних між собою складальних одиниць виробу,

r_i – кількість рангів, визначених для i -ї залежної групи.

Фізично зміна рангу у залежних групах складальних одиниць відповідає вибору нової базової деталі під час збирання виробу. Вибір тієї чи іншої базової деталі впливає на вибір технологічних баз, використання конкретного виду обладнання, точність з'єднань, кількість установок і позицій, тривалість робіт. Таким чином, зміна базової деталі з одного боку призводить до утворення нового варіанту складання, а з іншого – до зміни важливих показників технологічного процесу.

На рис. 5 представлено загальну схему алгоритму синтезу множини варіантів складання, який побудовано на основі розробленого методу.

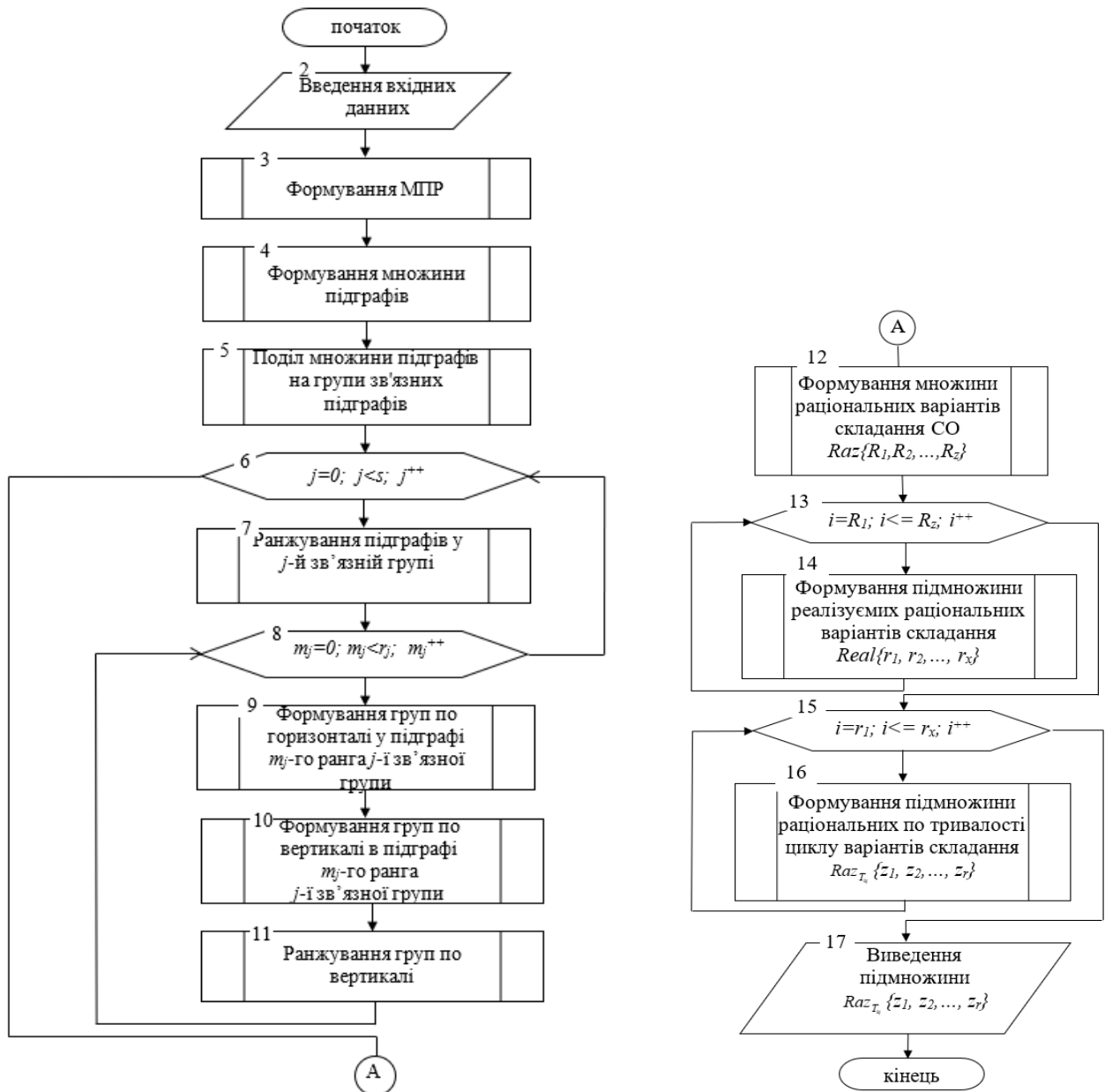


Рисунок 5 – Схема алгоритму синтезу варіантів складання виробу

Раціональними вважаються такі варіанти складання за яких показники технологічного процесу набувають оптимальних значень (блок 12, рис. 5). На практиці серед множини раціональних варіантів обираються ті, що можуть бути реалізовані у заданій виробничій системі за допомогою наявного обладнання (блок 14, рис. 5).

Висновки. В даній роботі розроблено метод, який дозволяє моделювати варіанти складання виробу послідовно з урахуванням розмірних ланцюгів, базування, доступу складальних елементів, екологічних обмежень та ін. технологічних факторів.

У процесі вирішення використовуються математичні моделі, що враховують особливості технологічного процесу та обмежують область пошуку можливих рішень.

Розроблений метод дозволяє отримати множину варіантів складання виробу у відповідності до його конструкторсько-технологічних ознак та технологічних можливостей засобів технологічного оснащення.

Практичне значення результатів роботи полягає в тому, що за розробленим методом реалізовано алгоритм, призначений для програмної реалізації автоматизованого пошуку раціональних варіантів складання.

Розроблений метод враховує особливості структури виробу, подальші дослідження будуть спрямовані на врахування конкретних виробничих умов та на пошук раціональних варіантів складання виробів, виходячи із внутрішніх резервів виробничої системи.

Присвячення і подяка.

Світлій пам'яті доктора технічних наук, професора Захарова Миколи Володимировича [25], який вперше обґрунтував методологічні засади вирішення задачі, що розглядається, автори присвячують цю статтю.



Захаров Микола Володимирович
(1958 - 2006)

Список бібліографічного опису

1. Belov, V., Abramov, D., & Ahmed, R. (2018). Technological Prerequisites for Designing Automated Control System for Technological Process of Production of High-Strength Fine-Grained Concrete on Local Fibrous Basalt Wool Wastes. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 1–6. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501767>
2. Trofimova, M. S., Panov, A. Y., & Kuznetsov, S. V. (2018). Automated System of Analysis of Reasons and Consequences of Defects of Mechanical Engineering Products. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 1–5. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501703>
3. Shnyder, D. A., & Kalinina, E. A. (2020). Automated System-Adviser Based on a Model for Control of the Technological Process of Concentrate Production. 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC), 335–341. <https://doi.org/10.1109/GloSIC50886.2020.9267859>
4. Salah, Y. Ben, Weiguo, L., Sellami, L., Hamida, A. Ben, & Ailing, T. (2022). New and optimal set up for 3D-based stereovision system for manufacturing inspection in 4.0 industry. 2022 6th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ATSIP55956.2022.9805872>
5. Smityuh, Y., Kyshenko, V., Romashchuk, O., & Gorpichenko, A. (2022). Intelligent synergistic control of the technological complex for the sugar factory. 2022 IEEE 11th International Conference on Intelligent Systems (IS), 1–5. <https://doi.org/10.1109/IS57118.2022.10019728>
6. Burov, O., Lavrov, E., Lytvynova, S., Pinchuk, O., Horska, K., Tkachenko, O., Kovalenko, N., & Chybiriak, Y. (2023). On the way to hybrid intelligence: influence of the human-system interaction rate on the human cognitive performance. <https://doi.org/10.54941/ahfe1002925>
7. Lavrov, E., Siryk, O., Chybiriak, Y., Danilova, L., Nahorni, V., & Vakal, S. (2021). A Model for the Organization of Adaptive Dialogue Interaction “Man-Computer” Taking into Account the Requirements of Reliability and Efficiency. 2021 IEEE 4th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), 31–35. <https://doi.org/10.1109/AICT52120.2021.9628939>
8. Lavrov, E. A., Siryk, O. E., Chybiriak, Y. I., Zolkin, A. L., & Sedova, N. A. (2022). Human-centered management in polyergatic information systems. Multi-criteria distribution of functions between operators. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1049(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012020>
9. E. Lavrov, O. Siryk, I. Kirichenko, N. Barchenko, Y. C. (2021). The Methodology of Managed Functional Networks for Organizing Effective and Adaptive Human-Machine Dialogue in Automated Systems. 428–437.
10. E. Lavrov, Y. Chybiriak, O. Siryk, V. Logvinenko, A. Z. (2022). Training of Specialists for Adaptive management. Techniques for Teaching Computer Analysis of Automated Production Systems in the FlexSim Environment. 106–118.
11. Meyer, F., Hinrichsen, S., & Niggemann, O. (2023). *How to Generate Assembly Instructions with Robotic Process Automation*. <https://doi.org/10.54941/ahfe1004070>
12. Shi, D., Rahimpour, A., Ghafourian, A., Naddaf Shargh, M. M., Upadhyay, D., Lasky, T. A., & Soltani, I. (2023). Deep Bayesian-Assisted Keypoint Detection for Pose Estimation in Assembly Automation. *Sensors*, 23(13), 6107. <https://doi.org/10.3390/s23136107>
13. Sathiyaraj, S., Selvababu, B., Richard E., A., Varghese, A. C., & Vijay P., A. (2023). *Design and fabrication of fixture for automation in cover plate assembly process*. 020111. <https://doi.org/10.1063/5.0111083>
14. Lelyukhin, V., & Kolesnikova, O. (2017). Approach to Determining Order of Production of Parts and Assembly Units

- of Engineering Products in Production Process Planning. *Procedia Engineering*, 206, 1515–1521. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.671>
15. Zeng, W., Jin, Z., Cao, Y., Yi, G., & Li, C. (2023). *Unitized Modelling and Reuse Method of Assembly Process Oriented to Product Family* (pp. 1687–1696). https://doi.org/10.1007/978-981-19-9398-5_102
16. Vaghela, D., Vasudevan, H., & Khavkar, R. (2023). *Improvement in Productivity of Assembly Line by Cycle Time Reduction: A Case Study* (pp. 35–43). https://doi.org/10.1007/978-981-19-7971-2_4
17. Zhang, C., Sun, Q., Sun, W., Shi, Z., & Mu, X. (2023). Performance-oriented digital twin assembly of high-end equipment: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(11–12), 4723–4748. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11457-3>
18. Shabanov, A., Averchenkova, E., & Averchenkov, V. (2022). MODEL AND ALGORITHM FOR CONTROLLING THE ASSEMBLY EQUIPMENT OF MECHANICAL ASSEMBLY SUPPLY SYSTEM. *Automation and Modeling in Design and Management*, 1, 43–55. <https://doi.org/10.30987/2658-6436-2022-1-43-55>
19. Fang, W., Fu, M., & Zheng, L. (2022). Continuous ergonomic risk perception for manual assembly operations using wearable multi-sensor posture estimation. *Assembly Automation*, 42(2), 209–217. <https://doi.org/10.1108/AA-03-2021-0027>
20. Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Starodubcev, N. (2023). An Automatic Assembly SMT Production Line Operation Technological Process Simulation Model Development. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2(2), 1–9. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.01>
21. Rane, A. B., & Sunnapwar, V. K. (2017). Assembly line performance and modeling. *Journal of Industrial Engineering International*, 13(3), 347–355. <https://doi.org/10.1007/s40092-017-0189-7>
22. Xu, Z.-J., Wang, P., Wang, Q.-H., & Li, J.-R. (2019). Integrating part modeling and assembly modeling from the perspective of process. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(2), 855–878. <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1288-9>
23. Rodriguez, I., Nottensteiner, K., Leidner, D., Durner, M., Stulp, F., & Albu-Schaffer, A. (2020). Pattern Recognition for Knowledge Transfer in Robotic Assembly Sequence Planning. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 3666–3673. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2979622>
24. Ma, L., Gong, J., Xu, H., Chen, H., Zhao, H., Huang, W., & Zhou, G. (2023). Planning Assembly Sequence with Graph Transformer. *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 12395–12401. <https://doi.org/10.1109/ICRA48891.2023.10160424>
25. О. В. Радчук. (2010). Захаров Микола Володимирович. У І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк ... та Я. С. Яцків (Ред.), *Енциклопедія Сучасної України*. Інститут енциклопедичних досліджень НАН України. <https://esu.com.ua/article-15802>

References

1. Belov, V., Abramov, D., & Ahmed, R. (2018). Technological Prerequisites for Designing Automated Control System for Technological Process of Production of High-Strength Fine-Grained Concrete on Local Fibrous Basalt Wool Wastes. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 1–6. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501767>
2. Trofimova, M. S., Panov, A. Y., & Kuznetsov, S. V. (2018). Automated System of Analysis of Reasons and Consequences of Defects of Mechanical Engineering Products. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 1–5. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501703>
3. Shnayder, D. A., & Kalinina, E. A. (2020). Automated System-Adviser Based on a Model for Control of the Technological Process of Concentrate Production. 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC), 335–341. <https://doi.org/10.1109/GloSIC50886.2020.9267859>
4. Salah, Y. Ben, Weiguo, L., Sellami, L., Hamida, A. Ben, & Ailing, T. (2022). New and optimal set up for 3D-based stereovision system for manufacturing inspection in 4.0 industry. 2022 6th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ATSIP55956.2022.9805872>
5. Smityuh, Y., Kysenko, V., Romashchuk, O., & Gorpichenko, A. (2022). Intelligent synergistic control of the technological complex for the sugar factory. 2022 IEEE 11th International Conference on Intelligent Systems (IS), 1–5. <https://doi.org/10.1109/IS57118.2022.10019728>
6. Burov, O., Lavrov, E., Lytvynova, S., Pinchuk, O., Horska, K., Tkachenko, O., Kovalenko, N., & Chybiriak, Y. (2023). On the way to hybrid intelligence: influence of the human-system interaction rate on the human cognitive performance. <https://doi.org/10.54941/ahfe1002925>
7. Lavrov, E., Siryk, O., Chybiriak, Y., Danilova, L., Nahomyi, V., & Vakal, S. (2021). A Model for the Organization of Adaptive Dialogue Interaction “Man-Computer” Taking into Account the Requirements of Reliability and Efficiency. 2021 IEEE 4th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), 31–35. <https://doi.org/10.1109/AICT52120.2021.9628939>
8. Lavrov, E. A., Siryk, O. E., Chybiriak, Y. I., Zolkin, A. L., & Sedova, N. A. (2022). Human-centered management in polyergatic information systems. Multi-criteria distribution of functions between operators. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1049(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012020>
9. E. Lavrov, O. Siryk, I. Kirichenko, N. Barchenko, Y. C. (2021). The Methodology of Managed Functional Networks for Organizing Effective and Adaptive Human-Machine Dialogue in Automated Systems. 428–437.
10. E. Lavrov, Y. Chybiriak, O. Siryk, V. Logvinenko, A. Z. (2022). Training of Specialists for Adaptive management. Techniques for Teaching Computer Analysis of Automated Production Systems in the FlexSim Environment. 106–118.
11. Meyer, F., Hinrichsen, S., & Niggemann, O. (2023). *How to Generate Assembly Instructions with Robotic Process Automation*. <https://doi.org/10.54941/ahfe1004070>
12. Shi, D., Rahimpour, A., Ghafourian, A., Naddaf Shargh, M. M., Upadhyay, D., Lasky, T. A., & Soltani, I. (2023). Deep Bayesian-Assisted Keypoint Detection for Pose Estimation in Assembly Automation. *Sensors*, 23(13), 6107. <https://doi.org/10.3390/s23136107>
13. Sathiyaraj, S., Selvababu, B., Richard E., A., Varghese, A. C., & Vijay P., A. (2023). *Design and fabrication of fixture*

- for automation in cover plate assembly process. 020111. <https://doi.org/10.1063/5.0111083>
14. Lelyukhin, V., & Kolesnikova, O. (2017). Approach to Determining Order of Production of Parts and Assembly Units of Engineering Products in Production Process Planning. *Procedia Engineering*, 206, 1515–1521. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.671>
15. Zeng, W., Jin, Z., Cao, Y., Yi, G., & Li, C. (2023). Unitized Modelling and Reuse Method of Assembly Process Oriented to Product Family (pp. 1687–1696). https://doi.org/10.1007/978-981-19-9398-5_102
16. Vaghela, D., Vasudevan, H., & Khavekar, R. (2023). Improvement in Productivity of Assembly Line by Cycle Time Reduction: A Case Study (pp. 35–43). https://doi.org/10.1007/978-981-19-7971-2_4
17. Zhang, C., Sun, Q., Sun, W., Shi, Z., & Mu, X. (2023). Performance-oriented digital twin assembly of high-end equipment: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(11–12), 4723–4748. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11457-3>
18. Shabanov, A., Averchenkova, E., & Averchenkov, V. (2022). MODEL AND ALGORITHM FOR CONTROLLING THE ASSEMBLY EQUIPMENT OF MECHANICAL ASSEMBLY SUPPLY SYSTEM. *Automation and Modeling in Design and Management*, 1, 43–55. <https://doi.org/10.30987/2658-6436-2022-1-43-55>
19. Fang, W., Fu, M., & Zheng, L. (2022). Continuous ergonomic risk perception for manual assembly operations using wearable multi-sensor posture estimation. *Assembly Automation*, 42(2), 209–217. <https://doi.org/10.1108/AA-03-2021-0027>
20. Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Starodubcev, N. (2023). An Automatic Assembly SMT Production Line Operation Technological Process Simulation Model Development. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2(2), 1–9. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.01>
21. Rane, A. B., & Sunnapwar, V. K. (2017). Assembly line performance and modeling. *Journal of Industrial Engineering International*, 13(3), 347–355. <https://doi.org/10.1007/s40092-017-0189-7>
22. Xu, Z.-J., Wang, P., Wang, Q.-H., & Li, J.-R. (2019). Integrating part modeling and assembly modeling from the perspective of process. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(2), 855–878. <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1288-9>
23. Rodriguez, I., Nottensteiner, K., Leidner, D., Durner, M., Stulp, F., & Albu-Schaffer, A. (2020). Pattern Recognition for Knowledge Transfer in Robotic Assembly Sequence Planning. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 3666–3673. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2979622>
24. Ma, L., Gong, J., Xu, H., Chen, H., Zhao, H., Huang, W., & Zhou, G. (2023). Planning Assembly Sequence with Graph Transformer. *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 12395–12401. <https://doi.org/10.1109/ICRA48891.2023.10160424>
25. O. V. Radchuk. (2010). Mykola Volodymyrovych Zakharov. In I. M. Dzyuba, A. I. Zhukovsky, M. G. Zheleznyak ... and I. S. Yatskiv (Eds.), *Encyclopedia of Modern Ukraine*. Institute of Encyclopedic Research of the National Academy of Sciences of Ukraine. <https://esu.com.ua/article-15802>

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-05>

UDC 517.1:519.7:62-50

Dymova Hanna, Candidate of Technical Sciences, Phd., Associate Professor,

<https://orcid.org/0000-0002-5294-1756>

Kherson State Agrarian and Economic University, Kherson, Ukraine

DYNAMIC OPERATOR EXTRACTION METHOD

Dymova H. Dynamic Operator Extraction Method. A "black box" is used to mean an object whose internal structure is unknown and information about its structure and functioning can only be partially obtained by analyzing the input-output connections of this object. Not only those material, energy and/or informational flows that are necessary for its functioning in accordance with the goals set before it - signals, but also those that actually complicate the realization of the set goal by the system - obstacles come to the input of the system from the external environment. An unregulated facility is being explored here. When studying such an object, it is important that the signals always describe the behavior of the object as a whole and reflect the individual movements of a large number of its microparticles of the same type. The analysis of the structure of the object based on its established signal is insufficient, if only the dynamic dependence on time is taken into account, even the most detailed registration of the single solution of the established dynamic equation does not allow revealing the structure of the operator in real situations. The inadequacy of the usual black box scheme for studying an unregulated object based on a settled signal leads to the need to account for internal fluctuations in the equations of the object signal. Therefore, the article considers autonomous objects, in the dynamic equations of which time t is not explicitly included. The work formulates and to some extent substantiates a fairly general and fairly simple principle of signal description. According to this basic premise, the properties of the signal, which are quantitatively significant and regularly manifest under the given conditions of observation, are connected to each other by some dynamic structure of the object. The role of object movements, which are less important under these conditions, as well as the role of the external environment, is reflected in this description by the time-fluctuating force $F(t)$ that disturbs the dynamic system. The study of the statistical properties of the response of the dynamic system to the fluctuating disturbance $F(t)$ allows, in a fairly wide range of problems, to evaluate the dynamic characteristics of an unregulated object based on the established signal. The behavior of the signal, which is described by a linearized equation, requires the estimation of the coefficient $A_m^{(k)}(\mathbf{x})$, so the article considers possible schemes for estimating this coefficient.

Keywords: dynamical system, trajectory, fluctuation, phase space, dynamic motion, correlation matrix, mathematical expectation, variance.

Димова Г. О. Метод виділення динамічного оператора. Під "чорною скринькою" прийнято розуміти об'єкт, про внутрішню будову якого нічого невідомо та інформацію про будову та функціонування якого можна частково отримати лише аналізуючи вхідні-вихідні зв'язки цього об'єкта. На вхід системи надходять від зовнішнього середовища не тільки ті матеріальні, енергетичні та/або інформаційні потоки, які необхідні для її функціонування відповідно до поставлених перед нею цілей – сигнали, а й такі, що фактично ускладнюють реалізацію системою поставленої мети – перешкоди. Тут досліджується нерегульований об'єкт. При дослідженні такого об'єкта має значення те, що сигнали завжди описують поведінку об'єкта як цілого і відображують індивідуальні рухи великого числа його однотипних мікрочастин. Аналіз структури об'єкта за його встановленим сигналом недостатній, якщо враховувати тільки динамічну залежність від часу, навіть сама детальна реєстрація єдиного розв'язання динамічного рівняння, що встановилося не дозволяє в реальних ситуаціях розкрити структуру оператора. Непристосованість звичайної схеми чорної скриньки для вивчення нерегульованого об'єкта за сигналом, що встановився, призводить до необхідності обліку внутрішніх флуктуацій в рівняннях сигналу об'єкта. Тому у статті розглядаються автономні об'єкти, в динамічні рівняння яких час t у явному вигляді не входить. В роботі сформульований і в деякій степені обґрунтований доволі загальний та достатньо простий принцип опису сигналу. Згідно цьому основному положенню властивості сигналу, які є кількісно істотними і, що регулярно проявляються при даних умовах спостереження, зв'язуються між собою деякою динамічною структурою об'єкта. Роль менш істотних при цих умовах рухів об'єкта, також як і роль зовнішнього середовища, відображає в цьому описі збурювальна динамічна систему флуктуюча у часі сила $F(t)$. Дослідження статистичних властивостей відгуку динамічної системи на флуктуаційне збурення $F(t)$ дозволяє в доволі широкому колі задач оцінювати за сигналом, що встановився, динамічні характеристики нерегульованого об'єкта. Поведінка сигналу, яка описана лінеаризованим рівнянням, потребує оцінки коефіцієнта $A_m^{(k)}(\mathbf{x})$, тому в статті розглянуті можливі схеми оцінки цього коефіцієнту.

Ключові слова: динамічна система, траєкторія, флуктуація, фазовий простір, динамічний рух, кореляційна матриця, математичне сподівання, дисперсія.

Formulation of the problem. Planning an experiment, solving the problems of identification and forecasting the course of continuous technological processes, the problems of restoring information, as well as the analysis of the results of passive observations are now more important when moving to the study of increasingly complex phenomena. The following sequence of operations corresponds to the traditional research scheme:

- 1) obtaining experimental data means identifying the qualitative aspects of a phenomenon and building its model, writing model equations and solving them;
- 2) comparison of the solution with experiments and refinement of the model, etc.

Such a scheme of research is not always expedient. For the study of complex objects, when the overview of measurement results becomes a problem, a "black box" scheme is proposed, in which the

effects on the object are described formally as a set of excitations. This scheme, which results from the regular comparison of object responses at the output of the "black box" with excitations at its input, is characterized by a different sequence of operations [1-4]:

- 1) selection of an a priori class of model equations;
- 2) comparison of responses with excitations and obtaining specific equations of the model;
- 3) building a model.

In the simplest version, the relaxation to the steady limit motion in response to the initial deflection is analyzed. In principle, the task of finding the model equations can be solved if the disturbances at the input of the "black box" are sufficiently complete and allow to detect in the responses of the object all its degrees of freedom, essential in the observed phenomenon. Based on the previously formulated and substantiated general principle of signal description, it is necessary to investigate the behavior of the signal, which is described by a linearized equation, and to consider possible schemes for estimating the coefficient $A_m^{(k)}(\mathbf{x})$ of the dynamic system of the object.

Research analysis. The analysis of the dynamic structure of the object refers to three well-known problems of the theory of signals: problems of identification, when on the basis of known signals at the input and output of the system, a conclusion is made about the composition of the system and its characteristics; control problems, when the characteristics of the system and the input signal are known and the law of change of the signal at the output of the system or such an input signal that leads the system to a given state at the output is determined; measurement problems, when the output signal and the characteristics of the system are known, the characteristics of the input signal are determined. The theoretical basis for solving the given problem was the works of the following scientists: H.L. Van Tris, R.E. Kalman, Y.K. Willems, D. Grop.

At the first stage of the work, the analysis was carried out - the selection of a class, where general questions were resolved: based on a priori data about the object under study, one of the types of operator (functional, differential, integral or integral-differential) was reasonably chosen. At the same time, previous information obtained from the signal was taken into account. The statement of the problem and the scheme of its solution in the simplest version of the second stage of the analysis of the structure of the unregulated object are discussed. It was determined that the development of search methods in a certain class of equations belongs to inverse problems of analysis [1].

A general, simple principle of signal description, the properties of which are quantitatively significant and regularly manifested under the given observation conditions, is formulated and substantiated. According to the main provisions, the properties of the signal are connected to each other by some dynamic structure of the object. The study of the statistical properties of the response of the dynamic system to the fluctuating disturbance $F(t)$ makes it possible to evaluate the dynamic characteristics of an unregulated object based on the established signal [2].

Presentation of the main material and justification of the obtained results. Consider one of the possible schemes for estimating the coefficient $A_m^{(k)}(\mathbf{x})$ or $a_k(\mathbf{x})$ of the dynamic system of an object, linearized in deviations from the isolated limit trajectory $\mathbf{U}_0^+(\mathbf{x})$, nowhere in the region $G^+(\mathbf{x})$ filling a densely two-dimensional surface. First, consider the case where $\mathbf{U}_0^+(\mathbf{x})$ does not degenerate into a rest point. Let the record of the signal $U(t; \mathbf{x})$ on the interval $-\frac{\theta}{2} \leq t < \frac{\theta}{2}$ contain a large number Γ , ($\Gamma \gg 1$) of stochastically independent realizations $U_\gamma(t; \mathbf{x}) (t_{\gamma 1} \leq t < t_{\gamma 2}, \gamma = 1, 2, \dots, \Gamma)$. Let us assume for simplicity that each of these realizations at a fixed \mathbf{x} falls on the same segment $t'_1(\mathbf{x}) \leq t' < t'_2(\mathbf{x})$ of the phase change counted along the trajectory $\mathbf{U}_0^+(\mathbf{x})$ from some point $\mathbf{U}_0(\mathbf{x})$. In such a situation, at a low intensity of internal fluctuations, the observed motions $U_\gamma(t; \mathbf{x})$ repeatedly pass in a fairly narrow neighborhood $G^*(\mathbf{U}_0^+(\mathbf{x})), G^*(\mathbf{U}_0^+(\mathbf{x})) \subseteq G(\mathbf{U}_0^+(\mathbf{x}))$, section (t'_1, t'_2) , trajectory $U_0^+(\mathbf{x})$, practically without going beyond G^* for $t'_1 \leq t' < t'_2$. This allows on the interval (t'_1, t'_2) to estimate in the space $R_q(\mathbf{x})$ the position of the average statistical trajectory $\mathbf{U}^*(\mathbf{x})$, for which the mathematical expectation of deviations of the ensemble close to $\mathbf{U}_0^+(\mathbf{x})$ trajectories of a fluctuating object. We will calculate starting from the trajectory of some realization $\mathbf{U}_{\gamma 1}(\mathbf{x})$ as from the first approximation: $\mathbf{U}^{(1)}(\mathbf{x}) \equiv \mathbf{U}_{\gamma 1}(\mathbf{x})$. We implement the method of successive approximations as follows: through various points of the trajectory $\mathbf{U}_{(k)}(\mathbf{x})$ of the k -th approximation, we draw hyperplanes orthogonal to it. The trajectory passing through the centers of gravity of the points of intersection of these hyperplanes with each of the trajectories $\mathbf{U}_\gamma(\mathbf{x})$ will be taken as the $(k + 1)$ -th approximation of the average statistical trajectory $\mathbf{U}^{(k+1)}(\mathbf{x})$. The limiting trajectory $\mathbf{U}^{(\infty)}(\mathbf{x})$ for the sequence $\mathbf{U}^{(k)}(\mathbf{x})$ is characterized by the fact that the average value of the

deviations of realizations $\mathbf{U}_\gamma(\mathbf{x})$ orthogonal from it vanishes; thus, we can assume that $\mathbf{U}^{(\infty)}(\mathbf{x})$ evaluates the trajectory $\mathbf{U}^*(\mathbf{x})$.

With such a low intensity of internal fluctuations of the object that the observed implementations $G(\mathbf{U}_1(\mathbf{x}))$ do not go beyond the neighborhood $G(\mathbf{U}_0^+(\mathbf{x}))$ [5], where the signal behavior is described by linearized in $(n_1, n_2, \dots, n_{q-1})$ equations

$$\frac{dn_m}{dt'} + \sum_{k=1}^{q-1} A_m^{(k)}(t'; \mathbf{x})n_k = F_m(t'; \mathbf{x}) \quad (m = 1, 2, \dots, q - 1),$$

ω -limit trajectory of the dynamic system $\mathbf{U}_0^+(\mathbf{x})$, for which $n_k(t) \equiv 0, k = 1, 2, \dots, q - 1$, coincides with the average statistical trajectory, counted from $\mathbf{U}_0^+(\mathbf{x})$ orthogonal deviations $n_k^*(t')$ points of which are defined by the formulas $n_k^*(t') \equiv \langle n(t') \rangle$.

Now, knowing the position of the trajectory $\mathbf{U}_0^+(\mathbf{x})$ in the phase space $R_q(\mathbf{x})$, where the Cartesian coordinates are $U, \frac{dU}{dt}, \dots, \frac{d^{q-1}U}{dt^{q-1}}$, it is possible to mark the time of dynamic movement along $\mathbf{U}_0^+(\mathbf{x})$ of the representative point by choosing some state $\mathbf{U}_0^+(\mathbf{x})$ as the initial state. Then, in the neighborhood of $G(\mathbf{U}_0^+(\mathbf{x}))$ for each realization $U_\gamma(t; \mathbf{x})$ we find the functions $n_{k\gamma}(t'; \mathbf{x}), (k = 1, 2, \dots, q - 1)$ and $\sigma_\gamma(t'; \mathbf{x})$, which, in accordance with the above assumption, are stochastically independent for different γ [6-8].

Let us discuss a calculation scheme that allows us to estimate the values of the coefficients $A_0^{(k)}$ in the equation [9]

$$\frac{d\sigma}{dt'} + \sum_{k=1}^{q-1} A_0^{(k)}(t'; \mathbf{x})n_k = F_0(t'; \mathbf{x}).$$

Let's rewrite this equation for an arbitrary realization of $U_\gamma(t; \mathbf{x})$ in a more convenient form:

$$\frac{d\sigma_\gamma}{dt'}(t' + \tau; \mathbf{x}) + \sum_{k=1}^{q-1} A_0^{(k)}(t' + \tau; \mathbf{x})n_{k\gamma}(t' + \tau; \mathbf{x}) = F_{0\gamma}(t' + \tau; \mathbf{x}) \quad (1)$$

$(\gamma = 1, 2, \dots, \Gamma).$

Multiplying (1) by $n_{l\gamma}(t'; \mathbf{x}), (l = 1, 2, \dots, q - 1)$ and introducing the designations

$$\chi_{\Gamma 0l}^{(t'; \mathbf{x})}(\tau) \equiv \frac{1}{\Gamma} \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} n_{l\gamma}(t' + \tau; \mathbf{x}) \frac{d\sigma_\gamma}{dt'}(t' + \tau; \mathbf{x}) \quad (2)$$

$\eta_{\Gamma kl}^{(t'; \mathbf{x})}(\tau) \equiv \frac{1}{\Gamma} \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} n_{l\gamma}(t'; \mathbf{x}) n_{k\gamma}(t'; \mathbf{x}), \quad \varphi_{\Gamma 0l}^{(t'; \mathbf{x})}(\tau) \equiv \frac{1}{\Gamma} \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} n_{l\gamma}(t'; \mathbf{x}) F_{0\gamma}(t'; \mathbf{x})$
 we get the formulas

$$\chi_{\Gamma 0l}^{(t'; \mathbf{x})}(\tau) + \sum_{k=1}^{q-1} A_0^{(k)}(t' + \tau; \mathbf{x})\eta_{\Gamma kl}^{(t'; \mathbf{x})}(\tau) = \varphi_{\Gamma 0l}^{(t'; \mathbf{x})}(\tau) \quad (l = 1, 2, \dots, q - 1), \quad (3)$$

relating the sample correlation functions. As already mentioned, the stochastic connection between the time-shifted values of the fluctuation perturbation F related to the same \mathbf{x} disappears at shifts exceeding τ_0 . Since the response of a dynamic system to a disturbing force is determined only by the previous values of the force, the stochastic relationship between the signal U , as well as its projections σ and $n_l (l = 1, 2, \dots, q - 1)$, on the one hand, and the force F or its projections $F_m (m = 0, 1, \dots, q - 1)$ – on the other hand, it disappears when the force response precedes by a time greater than τ_0 [10, 11]. In particular,

$$\langle n_l(t'; \mathbf{x}) F_m(t'; \mathbf{x}) \rangle = 0, \quad \tau \geq \tau_0 \quad (l = 1, 2, \dots, q - 1; m = 0, 1, \dots, q - 1), \quad (4)$$

this implies

$$\chi_{0l}^{(t'; \mathbf{x})}(\tau) + \sum_{k=1}^{q-1} A_0^{(k)}(t' + \tau; \mathbf{x})\eta_{kl}^{(t'; \mathbf{x})}(\tau) = 0, \tau \geq \tau_0 \quad (l = 1, 2, \dots, q - 1), \quad (5)$$

where

$$\begin{aligned}\chi_{0l}^{(t';\mathbf{x})}(\tau) &\equiv \langle n_l(t' + \tau; \mathbf{x}) \frac{d\sigma}{dt'}(t'; \mathbf{x}) \rangle, \\ \eta_{lk}^{(t';\mathbf{x})}(\tau) &\equiv \langle n_l(t' + \tau; \mathbf{x}) n_k(t'; \mathbf{x}) \rangle.\end{aligned}$$

Since, in addition,

$$\langle [\varphi_{\Gamma 0l}^{(t';\mathbf{x})}(\tau)]^2 \rangle = \frac{1}{\Gamma} \langle [n_l(t'; \mathbf{x}) F_0(t' + \tau; \mathbf{x})]^2 \rangle, \quad (6)$$

can be estimated in the zeroth approximation the coefficients $A_0^{(k)}(t'; \mathbf{x})$ by the values $A_0^k(t'; \tau; \mathbf{x})$, based on the approximate formulas

$$\chi_{0l}^{(t'-\tau;\mathbf{x})}(\tau) + \sum_{k=1}^{q-1} A_0^{(k)}(t'; \mathbf{x}; \tau) \eta_{kl}^{(t'-\tau;\mathbf{x})}(\tau) = 0, \quad (7)$$

where, as τ we take the shift lying inside the interval $\tau_0 \leq \tau < \Theta_m(\mathbf{x})$.

Indeed, the random variables $\varphi_{\Gamma 0l}^{(t';\mathbf{x})}(\tau)$, which we neglected in the right-hand side of equations (3) after writing (7), have at $\tau \geq \tau_0$ according to (5), (6) zero mathematical expectations and variances tending to zero with increasing Γ [3, 4]. The results of such an estimate are random functions of τ . In order to make fuller use of the information contained in the observed signal, it is natural to refer to the estimates of the coefficients $A_0^{(k)}$, based on the minimum of the root-mean-square error formed by the values $\varphi_{\Gamma 0l}^{(t';\mathbf{x})}(\tau)$. However, the direct use of the technique usually used in such estimates to equations (3) at $t' + \tau = \Theta$ and different τ in order to obtain relations relating, like (6), the coefficients for identical phases (Θ), is hindered by a significant stochastic relationship between values $\varphi_{\Gamma 0l}^{(t';\mathbf{x})}(\tau)$. Indeed,

$$\begin{aligned}\langle \varphi_{\Gamma 0l}^{(\Theta-\tau_1;\mathbf{x})}(\tau_1) \varphi_{\Gamma 0k}^{(\Theta-\tau_2;\mathbf{x})}(\tau_2) \rangle = \\ = \frac{1}{\Gamma} \langle n_l(\Theta-\tau_1; \mathbf{x}) n_k(\Theta-\tau_2; \mathbf{x}) [F_0(\Theta; \mathbf{x})]^2 \rangle.\end{aligned}$$

For large Γ , the distribution of the vector random process $\varphi_{\Gamma 0l}^{(\Theta-\tau;\mathbf{x})}(\tau)$ ($l = 1, 2, \dots, q - 1$) tends to the Gaussian law; taking this into account, for $\tau_1, \tau_2 \geq \tau_0$ we can rewrite the last expression for its correlation matrix in the form

$$\begin{aligned}\langle \varphi_{\Gamma 0l}^{(\Theta-\tau_1;\mathbf{x})}(\tau_1) \varphi_{\Gamma 0k}^{(\Theta-\tau_2;\mathbf{x})}(\tau_2) \rangle = \\ = \frac{1}{\Gamma} \langle [F_0(\Theta; \mathbf{x})]^2 \rangle \langle n_l(\Theta-\tau_1; \mathbf{x}) n_k(\Theta-\tau_2; \mathbf{x}) \rangle.\end{aligned} \quad (23)$$

Conclusions and prospects for further research. For almost identical vanishing of all components of matrix (8) and, accordingly, disappearance at large Γ of the stochastic connection between the values $\varphi_{\Gamma 0l}^{(\Theta-\tau;\mathbf{x})}$ such large shifts are needed that the matrix $\eta_{kl}^{(\Theta-\tau_1;\mathbf{x})}$. But with such shifts, as it can be seen from equation (3), it is unreasonable to estimate the coefficients A_0^k while smaller values of $|\tau_1 - \tau_2|$ correspond to the components of the correlation matrix (8), falling off as $1/\Gamma$, that is, according to (5), at the same rate as the dispersions $\varphi_{\Gamma 0l}^{(\Theta-\tau;\mathbf{x})}$.

References

1. Dymova H.O., Larchenko O.V. (2022) Obnereni zadachi analizu nerehul'ovanoho ob'yekta [Inverse problems of the analysis of an unregulated object] Taurian Scientific Bulletin. Series: Technical sciences. Kherson State Agrarian and Economic University. Kherson: "Helvetika" publishing house. Vol. 6. DOI: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.6.5>
2. Dymova H.O. (2022) Analiz dynamichnoyi struktury ob'yekta [Analysis of the object's dynamic structure] KhNTU Bulletin. No. 2(81). DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.2.1>
3. Dymova H.O. (2020). Metody i modeli uporyadkuvannya eksperymental'noyi informatsiyi dlya identyfikatsiyi i prohnozuvannya stanu bezperervnykh protsesiv: monohrafiya [Methods and models for ordering experimental information for identifying and predicting the state of continuous processes] Kherson: Publishing house FOP Vyshemyrskyy V.S. [in Ukrainian].

4. Gudzenko, L. I. (1969). Nekotoryye voprosy struktury ob'yekta po ustanovivshemusya signalu [Some questions of the structure of the object on the basis of a steady signal]. Proceedings of the Physical Institute named after P. N. Lebedeva, 45, 110-133. [in Russian].
5. Hennen, E. (1974). Mnogomernyye vremennyye ryady [Multidimensional Time Series]. M.: Mir. [in Russian].
6. Tikhonov A. N., Goncharovskiy A. V., Stepanov V. V., Yagola A. G. (1983). Regulyaziruyushchiye algoritmy i apriornaya informatsiya [Regularizing algorithms and a priori information]. M.: Nauka. [in Russian].
7. Dymova H., Larchenko O. (2023) Sensitivity analysis of dynamic systems models. International security studios: managerial, economic, technical, legal, environmental, informative and psychological aspects. International collective monograph. Georgian Aviation University. Tbilisi, Georgia. DOI 10.5281/zenodo.7825520.
8. Dymova H. O. (2021). Informatsiynyy prostir ob'yektu v systemakh identyfikatsiyi [Information space of the object in identification systems]. Bulletin of the Kherson National Technical University, (4 (79)). [in Ukrainian].
9. Dymova H. O. (2021). Znakhodzhennya optymal'nykh znachen' funktsiy iz zastosuvannyam metodu spryazhenykh hradiyentiv [Finding optimal values of functions using the conjugate gradient method]. Taurian Scientific Bulletin. Series: Technical sciences (3), 3-9. doi: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2021.3.1> [in Ukrainian].
10. Dymova H.O., Dymov V.S. (2018) Heneruvannya vypadkovykh protsesiv dynamichnyu systemamy [Generation of random processes by dynamic systems]. Applied problems of mathematical modeling. Volume 1 No. 2. Kherson. DOI: 10.32782/2618-0340-2018-2-55-64.
11. Dymova H.O., Dymov V.S. (2019) Proektsiyni metody doslidzhennya obrnenykh zadach liniynykh dynamichnykh system [Projection methods of studying inverse problems of linear dynamic systems]. Applied problems of mathematical modeling. Volume 2 No. 1. Kherson. DOI: 10.32782/2618-0340-2019-3-17.

Список бібліографічного опису

1. Димова Г.О., Ларченко О.В. (2022) Обернені задачі аналізу нерегульованого об'єкта. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. Херсонський державний аграрно-економічний університет. Херсон: Видавничий дім «Гельветика». Вип. 6. DOI: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.6.5>
2. Димова Г.О. (2022) Аналіз динамічної структури об'єкта. Вісник ХНТУ. № 2(81). DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.2.1>
3. Димова, Г. О. (2020). Методи і моделі упорядкування експериментальної інформації для ідентифікації і прогнозування стану безперервних процесів. Херсон: Видавництво ФОП Вишемирський В.С.
4. Гудзенко, Л. И. (1969). Некоторые вопросы структуры объекта по установившемуся сигналу. Труды физического института имени П.Н. Лебедева, 45, 110-133.
5. Хеннан, Э. (1974). Многомерные временные ряды. Москва: Мир.
6. Тихонов А. Н., Гончаровский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. (1983). Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука.
7. Dymova H., Larchenko O. (2023) Sensitivity analysis of dynamic systems models. International security studios: managerial, economic, technical, legal, environmental, informative and psychological aspects. International collective monograph. Georgian Aviation University. Tbilisi, Georgia. DOI 10.5281/zenodo.7825520.
8. Димова, Г. О. (2021). Інформаційний простір об'єкту в системах ідентифікації. Вісник Херсонського національного технічного університету, (4 (79)).
9. Димова, Г. О. (2021). Знаходження оптимальних значень функцій із застосуванням методу спряжених градієнтів. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки (3), 3-9. doi: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2021.3.1>
10. Димова Г.О., Димов В.С. (2018) Генерування випадкових процесів динамічними системами. Прикладні питання математичного моделювання. Том 1 № 2. Херсон., DOI: 10.32782/2618-0340-2018-2-55-64.
- Димова Г.О., Димов В.С. (2019) Проекційні методи дослідження обернених задач лінійних динамічних систем. Прикладні питання математичного моделювання. Том 2 № 1. Херсон., DOI: 10.32782/2618-0340-2019-3-17.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-06>

УДК 658.8:004.73

Kaliuta Kiryl, Salesforce Developer

<https://orcid.org/0009-0007-1090-5697>

Globant, Warsaw, Poland

PERSONALIZING THE USER EXPERIENCE IN SALESFORCE USING AI TECHNOLOGIES

Kaliuta K. Personalizing the user experience in Salesforce using AI technologies. Artificial intelligence (AI) technology has transformed the interactive marketing experience of clients. Despite a large number of studies investigating the use of AI in interactive marketing, customization as a significant concept remains unexplored in marketing using AI research and practice. authors investigate appropriate research as well as insights on Salesforce interactive advertising. The authors highlight practice challenges at various points of the customer experience and give critical managerial advice as a solution to such problems. Personalization may help your business in a variety of ways. For starters, it may enhance customer loyalty and engagement by making consumers feel appreciated and understood. Second, it may aid your company's revenue growth by encouraging clients to make more purchases based on personalized suggestions. Third, it can boost retention rates of clients by increasing trust and decreasing the possibility that consumers would migrate to a rival. Fourth, it may enhance overall consumer satisfaction through rendering it more easy, efficient, and pleasurable. Your company is well-positioned to provide uniquely customised experience to customers at scale by embracing AI-powered customization technology. AI can aid in the discovery of important consumer data, the generation of forecasts about consumer habits and preferences, and the optimization of content and product suggestions. One can guarantee that AI-driven personalisation is successful and satisfies your customers' expectations by doing so.

Keywords: User experience, Customer journey, Salesforce, Artificial Intelligence, CRM.

Introduction. Personalization is the process through which a corporation customizes a customer's experience to their specific preferences, habits, and needs. It is critical for organizations because it enhances client happiness and loyalty, which leads to increased revenue. By providing individualized experiences, your company may gain consumer confidence and establish long-term, mutually beneficial connections (Gao & Liu, 2022).

Today the most organizations regarding the matter are keen on knowing it all, at some random time and progressively about each client taken independently: his temperament, perspective, goals, where he is (working, at home, voyaging...)? What is he doing (driving, paying attention to music, working out...)? What gadget or channel is he utilizing (portable, web, associated watch)? Yet additionally a progression of data viewing the setting like the climate, encompassing sound level or lighting, also obviously his utilization history as a customer for the brand. In any case, brands are additionally very much aware that this journey for data has its cutoff points as well. Utilizing individual information likewise implies a gamble of security encroachment (Riveiro & Thill, 2021).

Different examinations show that the customer is very much aware of the organizations' advantage in getting this individual data and that, generally, he is reluctant to share the most reasonable information, yet in addition that he is fairly able to share a specific sum under the accompanying essential circumstances (Chen et al., 2020):

- full straightforwardness from the brand with respect to its expectations;
- control and the board of his inclinations concerning sharing the data he has been unequivocally endowed with;
- if there is a quantifiable thought for such sharing.

The client's assumptions as far as client experience personalization are progressively high. He needs (Chen et al., 2020):

- Proactivity: the organization should expect his requirements by focusing on for instance, certain functionalities and certain substance or by exhorting him so he can arrive at his objective all the more rapidly. For example, Delta Carriers portable application - in the event of a crossing out or a failed to catch associating plane, permits you to promptly enlist again on the following accessible flight;
- Importance: the organization needs to dispose of the « surrounding commotion » of unessential solicitations. For instance, a site for vehicle spare parts will naturally show parts and frill that are viable with the client's vehicle image, model and year;
- Congruity: the point is to offer omni-channel encounters and smooth cycle from a channel to another (web, versatile, tablet PC...);

A. Personalization in salesforce

SFA systems were originally employed in the 1980s and have since become increasingly common in business-to-business settings, where they are considered as a "competitive necessity" that fosters "competitive parity." SFA is defined and distinguished by the application of information technology to assist the sales function. The SFA eco-system is made up of hardware, software, and service companies. SFA software businesses are classified into several subcategories (Sunkari, 2022).

Some suppliers are experts in SFA. They compete with enterprise suite suppliers that offer a wide range of IT solutions to businesses, such as logistics management, company resource planning, and customer relationship management, as well as CRM suite companies who incorporate SFA modules (Hu & Zhang, 2020).

SFA has several advantages, according to vendors and consultants, including better financing, reduced sales cycles resulting in faster inventory turnover and relationships with customers, higher earnings, more precise tracking, and enhanced a salesperson productivity, rise in sales, share of the market, win costs, cost-of-sales, and closing greater possibilities and profitability (Hu & Zhang, 2020).

SFA software businesses are classified into several subcategories. Some suppliers specialize in SFA. Their competitors include manufacturers of customer relationship management (CRM) suites, which integrate SFA elements into packages that perform across the three frontoffice departments of marketing, service, and sales. SFA offers a means for salespeople and management to gather, store, analyze, and distribute customer-related data. Customers' transaction and profiling data are often included. However, market statistics, competitive profiles, products libraries, price schedules, and other information may also be included (Sunkari, 2022).

Today, more people are at ease with businesses using important personal information in a transparent and useful manner. 61% of survey respondents acknowledged a degree of comfort with these tailored user experience strategies in the 2022 the Salesforce company State of the Connected Customer research. This is an increase from 52% the previous year. However, there is no clear understanding of what constitutes transparency and benefit (Hughes, 2023).

Personalization is a critical component in providing exceptional client experiences. Customer want to be recognized as humans, and they can sense this when they are viewed as generic characters.

The findings of the State of the Connected Customer Report, containing insights from 13,000+ consumers and over 4,000 corporate buyers globally, illustrate what a firm may lose if it does not offer a personalized customer experience (Hughes, 2023).

More than half of clients (56%), anticipate personalized offerings. Companies that do not personalize their experiences to the demands of each individual risk losing clients entirely. Customers' loyalty should not be taken for granted, with 71% of customers switching brands more than once in the previous year. Personalised interaction should also include how and when a company engages with a consumer — and they want a unified, fast, multichannel, real-time experience (SalesForce, 2022).

B. How to create good customer experiences

Customers always want a constant positive purchasing experience as well as the greatest possible value. If they don't want to buy pricey razor blades, they may sign up for low-cost monthly delivery.

Technological advancements have caused upheaval in every industry. Customers now have more options and greater freedom to transfer their business somewhere if they do not receive the service they expect. Indeed, 71% of customers changed companies at least one time during the previous year (SalesForce, 2019).

According to 78% of customers in Salesforce's State of Marketing survey, regular communications from one department to the next are critical to creating outstanding experiences. Personalization must be consistent across every department and platforms, online as well as offline. Although it may appear to be a difficult endeavor, the use of artificial intelligence has already helped marketers in tackling customization at scale (SalesForce, 2019). Marketers all around the world are already getting on board with AI, with 79% now using it or expecting to use it over the next two years. According to Salesforce, AI will expand 257% in the next two years. AI is clearly becoming a new tool in the marketing toolkit (SalesForce, 2019).

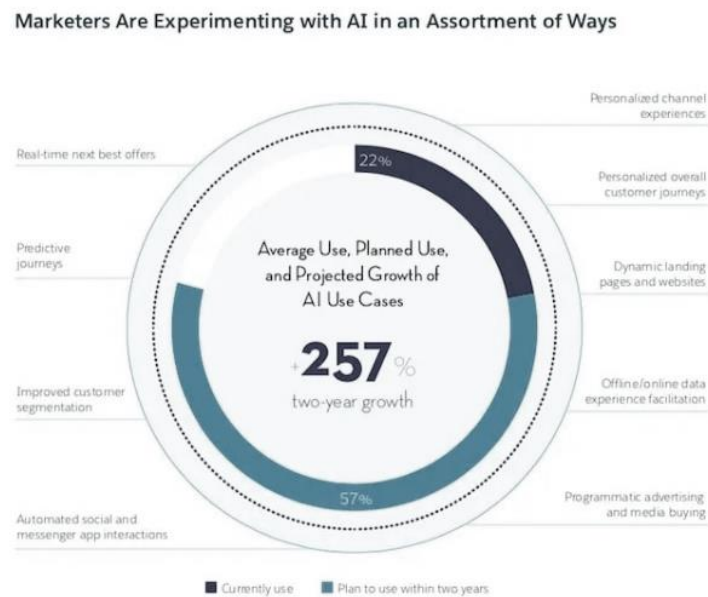
Methodology. Sufficient literature was necessary to provide a good foundation for this approach. The literature was in the form of journal papers, books, and scientific pieces on the internet. Among the sources are IEEE, Springer, , and Towards Data Science (Medium).

Due to the lack of established standards and a lack of consensus on terminologies conducting a cross-disciplinary review through adjacent fields, such as the one presented, makes it difficult to methodically

retrieve and identify relevant scientific works. These difficulties are eased by using the scoping review technique to collect data across a wide range of disciplines and research designs. Furthermore, scoping studies may be used to demonstrate the volume and breadth of research activity within a topic, determining the worth of doing a subsequent systematic assessment that can identify research gaps and indicate future paths.

Result and discussion. People often talk about artificial intelligence in lofty, complicated terms, such as self-driving automobiles or talking robots. However, AI is cheaper than you may believe, and it has several applications which make sense for your advertising strategy.

Marketers may use AI to conduct a wide range of customization activities, such as actual time next better offers, prediction journeys, enhanced segmentation of customers, and more. And you don't have to go directly into large-scale, difficult implementation. You may build up simple AI tasks that have been shown to yield ROI.



AI, for example, may assist you in taking the optimization of your landing pages to an additional level. Without AI, you might conduct a basic A/B test on the landing page to see which page performs better. The better-performing headline might then be made the new norm.

When AI is added to the mix, though, you can offer up more dynamic, tailored content to each unique user. Instead of simple A/B testing, AI may provide a tailored answer to every single visitor on your site, based on customer data. When clients visit your website, they will be able to see what is most essential to them as individuals. No more guessing contests - AI will give what your consumers are seeking, making the road to buy easier than before.

The Marketing Cloud is an online advertising solution of salesforce that allows you to better understand your customers, customise their experiences, and engage people across many channels. Here are three immediate ways to leverage Marketing Cloud to provide customized services at scale.

C. Personalization across channels should be automated for more seamless journeys.

Automation can help you develop and execute customised experiences for your whole audience. You may, for example, customize content across emails, landing sites, SMS messages, and push messages by creating emails that render information on a subscriber-by-subscriber basis. The final result is a smooth, tailored experience for each of your consumers with no more work on your part.

Marketing automation system can modify your data extension from the landing pages as it pulls data for each tailored message, making future encounters even more personalised for that consumer based on their involvement, user actions, or information they offer. Let AI inform your decision-making. AI has the ability to assist your marketing team in improving segmentation, optimizing send times, and personalizing product suggestions. AI-powered advanced personalisation can also boost your ABM (Account-Based Marketing) approach. You may use AI to find new prospects and track them throughout the sales process, offer tailored adverts and interactions with customers, and provide deep data analysis that your marketing and sales personnel can utilize to enhance customer experiences (Saifi, 2021).

D. Provide your marketers with the tools they need to simplify dynamic content.

Dynamic material is a valuable tool to have in your marketing arsenal. Your marketing team can quickly drag and drop custom content blocks or widget into messages for real-time personalisation by designing dynamic content block or widgets.

Assume you were employed by a retail business that specialized in camping supplies and gear, and one of your latest email campaigns targeted year-round outdoor fans. Your developers may use dynamic content to construct a bespoke content blocks that presents real-time weather information in a subscriber's geographic location and then sends them to season content or items based on tailored suggestions (SalesForce, 2019a).

E. Salesforce uses generative AI in its marketing efforts and purchasing experiences.

Salesforce Inc. announced today the introduction of two new generative artificial intelligence products, Marketing GPT and Commerce GPT.

The former is intended to assist marketers in creating individualized emails and smarter marketing journeys, whilst the latter is intended to assist businesses in creating more personalized purchasing experiences and customized suggestions.

Salesforce introduced the new products as it expanded its strategic alliance with Google Cloud including a pair of fresh connectors geared to help businesses harness AI. The objective is to gain a better knowledge of their consumers' behavior, to give tailored experiences, and to execute more successful marketing efforts. Salesforce has been aggressively pushing generative AI this year, in hopes of capitalizing on one of technology's biggest trends. Salesforce CEO Marc Benioff stated last week that the business plans to lead the next significant transformation in CRM by incorporating generative AI into almost all of its apps and services, and the company has spent no time in making good on that promise (de Jong et al., 2021).

1) Marketing GPT

According to Salesforce, the new Marketing GPT service is going to be able to assist advertisers with a variety of tasks due to a slew of skills it will provide. For example, using natural language prompting and AI-powered recommendations, its Segment Creation tool, which will be available in test this summer, will assist advertisers in swiftly creating audience groups and improving targeting.

Email Content Creation, which will be released in beta in October, will allow customers to auto-generate customised emails in order to boost customer engagement. To provide a more comprehensive perspective of audience engagement, Segment Insight for Data Cloud will seamlessly combine first-party data, revenue data, and third-party paid advertising data. Fast Identification Resolutions, Segment and Participation, that automatically recognizes consumers and updates groups in Salesforce Data Cloud, and Typeface, that can be used to generate relevant visual assets for marketing campaigns, are other features inside Marketing GPT (van der Doelen, 2022).

Personalization based on predictive analytics. Salesforce's Marketing Cloud Personalization gathers detailed information about each customer and uses artificial intelligence to offer personalized, cross-channel experiences at each stage in your customers' journey. Their online behavior will be tracked by first-party cookies, within the app, and email. By identity-stitching data from numerous data sources, Marketing Cloud Personalization can identify the subsequent action for each consumer and adapt messages on various platforms accordingly in real-time.

When a consumer browses the 'day cream' category, the Marketing Cloud's Personalization evaluates the user's affinity with this group of products. The technology may personalize the website by modifying the home page banners and suggestions by integrating an individual's user behavior with the information of other customers. If a customer leaves the site without making a purchase but has high conversion intent, there are several ways to contact out to them, including sending AI-powered emails (van der Doelen, 2022).

2) Commerce GPT

Commerce With Goals Driven Commerce, a new platform that allows organizations to define targets and goals and then create relevant data and suggestions on how to reach them, GPT will assist to automate growth. Dynamic description systems will help businesses by automatically populating lacking catalog data with auto-generated descriptions of goods suited to unique purchasers. Finally, Business Concierge will enable individualized dialogues with customers and assist them in discovering new items using natural language interactions via digital marketplaces and messaging apps. Although much of the focus will undoubtedly be on Salesforce's new content generating capabilities, the audience segmentation feature is likely to have the biggest positive impact on marketers (Ghoshal, 2023).

3) Google Cloud integrations

Salesforce is also making a difference in other sectors because to its collaboration with Google Cloud. It has resulted to a pair of new connections that will allow businesses to combine their data with bespoke AI models to better forecast client demands while lowering the cost, risk, and complexity of data synchronization between platforms.

The first collaboration between Salesforce Data Cloud and Google BigQuery will enable businesses to develop unified profiles of their consumers by combining data from many platforms and clouds, and then provide highly tailored experiences based on those profiles. Companies will be able access consumer data from one place, eliminating the need to first extract, convert, and load the data (Wiggers, 2023).

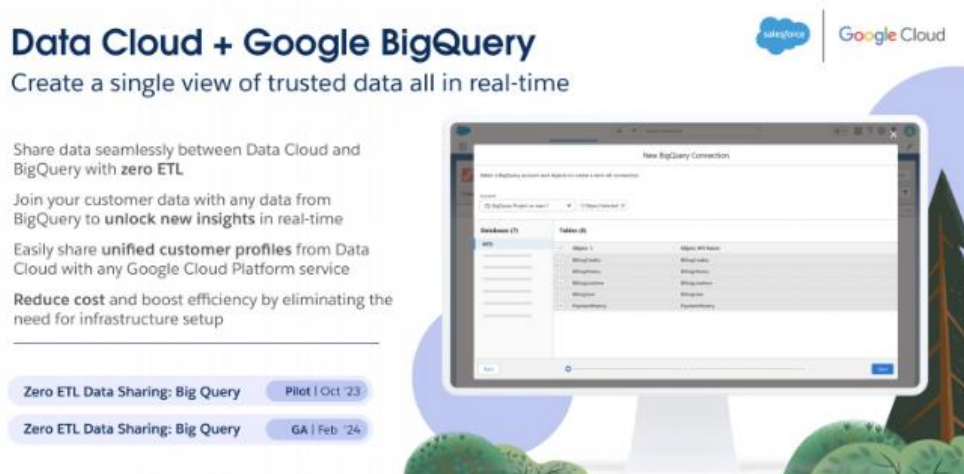


Figure 1: Data Cloud with google integration in salesforce (SalesForce, 2022)

Meanwhile, the Salesforce Data Cloud and Google Vertex AI interface allows users to construct customized AI models in Vertex AI and utilize them throughout Salesforce's CRM platform without having to move data. According to Salesforce, this streamlines the process of establishing and training models to forecast buyer behavior, customer attrition, and other factors (Wiggers, 2023).

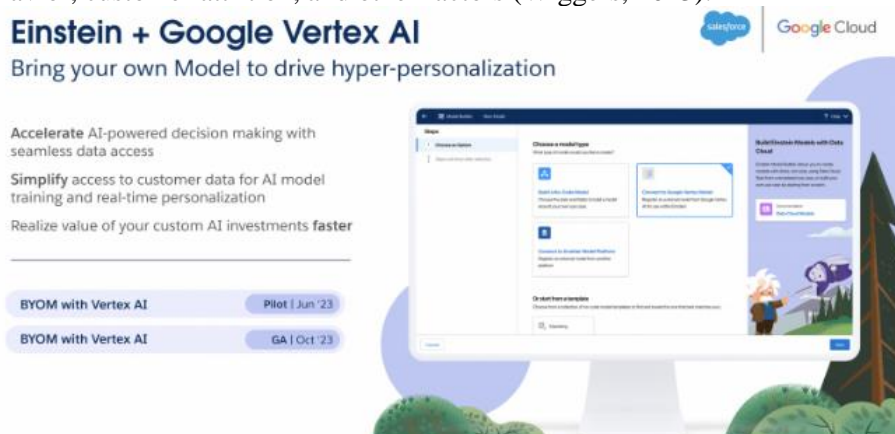


Figure 2: Einstein and google cloud integration (SalesForce, 2022)

Salesforce claims that the two connectors will allow a fashion store to combine CRM data like a customer's purchase history and interactions with service with non-CRM data like social media sentiments and real-time online activity. analyzing that mix of data, they will be able to install specialized AI models that can estimate their chances of purchasing specific sorts of clothes. They may then use this to provide customised suggestions to that consumer (SuperCloud3, 2023).

On the other hand, a healthcare provider can link CRM data like appointments history and patient feedback to non-CRM data like patient demographics to train models that forecast which individuals are at risk of readmission. They can then develop individualized treatment strategies for their most vulnerable patients.

Conclusion and future research. Salesforce's power to be a game changer for your company in a variety of ways. Salesforce has transformed the way corporate operations are optimized, whether in sales management or marketing. The essence of a CRM, though, is the customer experience, and Salesforce has considerably more to offer in this regard. Businesses can now improve their customer experiences and deliver them tailored content like never before thanks to the Salesforce Commerce Cloud. The technological stack must change in tandem with the customer landscape. If marketers want to provide really meaningful experiences, they must not only incorporate personalisation but also guarantee that the methods they use meet industry standards of excellence.

Future study might look at how much the importance of personalization varies depending on the B2B setting. This might be accomplished through a series of case studies. Furthermore, the study we conducted just looked at the marketing components; future research might look at the processes of co-creating benefit between customers and providers in the case of personalization, as suggested by the fundamental characteristic.

References

1. Chen, T., Guo, W., Gao, X., & Liang, Z. (2020). AI-based self-service technology in public service delivery: User experience and influencing factors. *Government Information Quarterly*, 38(4), 101520. <https://doi.org/10.1016/j.giq.2020.101520>
2. de Jong, A., de Ruyter, K., Keeling, D. I., Polyakova, A., & Ringberg, T. (2021). Key trends in business-to-business services marketing strategies: Developing a practice-based research agenda. *Industrial Marketing Management*, 93, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2020.12.004>
3. Gao, Y., & Liu, H. (2022). Artificial intelligence-enabled personalization in interactive marketing: a customer journey perspective. *Journal of Research in Interactive Marketing*, 1–18. <https://doi.org/10.1108/jrim-01-2022-0023>
4. Ghoshal, A. (2023, June 8). *Salesforce's Marketing GPT and Commerce GPT to help build personalized services*. CIO. <https://www.cio.com/article/481734/salesforces-marketing-gpt-and-commerce-gpt-to-help-build-personalized-services.html>
5. Hu, J., & Zhang, B. (2020, June 1). *Application of SalesForce Platform in Online Teaching in Colleges and Universities under Epidemic Situation*. IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/ICBAIE49996.2020.00065>
6. Hughes, K. (2023, July 5). *Designing Personalized User Experiences with Data and AI? Keep This in Mind*. Salesforce. <https://www.salesforce.com/blog/designing-personalized-user-experiences-with-data-ai-keep-this-in-mind/>
7. Riveiro, M., & Thill, S. (2021). "That's (not) the output I expected!" On the role of end user expectations in creating explanations of AI systems. *Artificial Intelligence*, 103507. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2021.103507>
8. Saifi, S. (2021). *Cloud Computing Using Salesforce: Build and Customize Applications for your business using the Salesforce Platform (English Edition)*.
9. Salesforce. (2019a). *Creating Personalized Content in Marketing Cloud - Salesforce Blog*. [www.salesforce.com. https://www.salesforce.com/content/blogs/us/en/2018/12/create-personalized-content-marketing-cloud.html](https://www.salesforce.com/content/blogs/us/en/2018/12/create-personalized-content-marketing-cloud.html)
10. Salesforce. (2019b, August 19). *Why Marketers Need to Build Great Customer Experiences With AI*. Salesforce. <https://www.salesforce.com/blog/marketers-customer-experience-ai/>
11. Salesforce. (2022, October 18). *How Personalisation Transforms Customer Experience*. Salesforce. <https://www.salesforce.com/au/blog/how-personalisation-transforms-customer-experience/>
12. Sunkari, S. (2022). A Brief Review on CRM, Salesforce and Reasons Stating Salesforce as One of the Top CRM's. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4158451>
13. SuperCloud3. (2023, June 7). *Salesforce deploys generative AI for personalized marketing campaigns and shopping experiences*. SiliconANGLE. <https://siliconangle.com/2023/06/07/salesforce-deploys-generative-ai-personalized-marketing-campaigns-shopping-experiences/>
14. van der Doelen, B. (2022, November 1). *Personalise your customer experience with Salesforce*. DEPT®. <https://www.deptagency.com/insight/personalise-your-customer-experience-with-salesforce/>
15. Wiggers, K. (2023, June 7). *Google Cloud and Salesforce team up to bolster AI offerings*. TechCrunch. <https://techcrunch.com/2023/06/07/google-cloud-and-salesforce-team-up-to-bolster-ai-offerings/>

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-07>

UDC 681.326.74

Krulikovskyi Borys, Phd., Associate Professor

<https://orcid.org/0000-0001-7944-551X>

Nazaruk Vitalii, к.т.н., Phd., Senior Lecturer

<https://orcid.org/0000-0003-3705-5155>

Reinska Victoria, Phd., Associate Professor

<https://orcid.org/0000-0002-3969-2054>

National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

DEVELOPMENT OF THE MATHEMATICAL APPARATUS OF BOOLEAN DERIVATIVES TO IMPROVE THE RELIABILITY AND VALIDITY OF INFORMATION PROCESSING.

Krulikovskyi B., Nazaruk V., Reinska V. Development of the mathematical apparatus of Boolean derivatives to improve the reliability and validity of information processing. The article substantiates the concept of the Boolean derivative of the generalized logic model (GLM) with respect to the fault parameter and the basis of its use for solving technical diagnostics problems. Since such a GLM describes the occurrence of faults of arbitrary multiplicity, the diagnostic tests built using this model allow quick identification of the technical condition of the logic circuit, and therefore reduce the recovery time and improve the reliability and validity of information processing.

Key words: logic circuits, technical diagnostic, Boolean derivatives, reliability, validity, information processing.

Круліковський Б.Б., Назарук В.Д., Рейнська В.Б. Розвиток математичного апарату Булевих похідних для покращення захищеності та надійності обробки інформації. В статті обгрунтоване поняття булевої похідної узагальненої логічної моделі (УЛМ) відносно параметра несправності та основи її використання для розв'язку задач технічної діагностики. Оскільки така УЛМ описує появу несправностей довільної кратності, то діагностичні тести, що побудовані з використанням вказаної моделі, дозволяють швидко ідентифікувати технічний стан логічної схеми, а значить скоротити час відновлення і підвищити надійність та достовірність обробки інформації.

Ключові слова: логічні схеми, технічна діагностика, булеві похідні, надійність, валідність, обробка інформації

Formulation of a scientific problem. Improvements based on the microminiaturization of computer equipment lead to an increase in the packing density of elementary logic gates on the crystal and, as a result, to an increase in the complexity of the logic structure of the microcircuit. Increasing the complexity of logic circuits requires a significant increase in computing power to solve the issues of their technical diagnostics, which will certainly arise at the stage of operation of such devices as part of computer systems. In turn, the formalization of methods for building algorithms for diagnosing the technical condition of any object requires the presence of a mathematical model of a computing device, the processing of which makes it possible to solve the entire list of direct and inverse problems of their technical diagnosis.

Such a formal description is usually called a mathematical model of the diagnostic object [1]. On the basis of such mathematical models, direct and inverse problems of technical diagnostics are formulated and solved, which are the basis of procedures for ensuring sufficient reliability parameters of technical means during their intended operation.

It is the effective solution of direct tasks of technical diagnostics of serviced hardware that can significantly reduce the recovery time of a digital device, and thus increase the reliability of information processing, i.e. its security in the face of accidental or specially organized defects by intruders.

When the degree of integration of the elemental basis of discrete computing equipment increases, the probability of occurrence of not only single but also multiple malfunctions in the production, storage and operation of such systems increases. Therefore, modern approaches to solving problems of technical diagnostics cannot be limited to predicting the occurrence of single malfunctions or malfunctions of a certain multiplicity. The closest to reality can be taking into account the uncertain technical condition of the diagnostic object, in which the presence of an arbitrary number of constant malfunctions is possible [2].

Constant malfunctions are understood as malfunctions that lead to the fixation of signal values in arbitrary places of the logic circuit of the digital device by constants 0 or 1.

For modeling such systems, generalized logic models (GLM) of digital circuits [3, 4] were widespread, in which the possible appearance of constant defects is described by changing the values of fault parameters, have become sufficiently widespread.

Particularly attractive is the use of an implicit mathematical model in the form of a structural system of Boolean functions, which stores information about the relationships between the nodes of the device's logic circuit. This makes it possible to immediately take into account the information about the location of

the defect when building a verification test, bypassing the process of synthesizing a diagnostic test. This significantly reduces the cost of implementing the process of technical diagnostics of the device under test. This reduces the time required to restore the object under test, thus increasing its reliability and the degree of protection of the information it processes.

The development of diagnostic support for complex computer systems requires solving two types of problems. The development of diagnostic support for complex computer systems requires solving two types of problems. The first group consists of direct tasks of technical diagnostics, which consist in determining the actual technical condition of the object of diagnosis by conducting diagnostic experiments on it. The problem is solved by applying test signals to the inputs of the device and measuring the system's reactions to these signals. by him. The problem is solved by applying test signals to the inputs of the device and measuring the system's reactions to these signals. Analysis of reactions to test signals allows to determine the actual technical condition of the system. The second class of technical diagnostics tasks are inverse tasks, that consisting in the calculation of test signals and procedures for carrying out the specified diagnostic experiments.

To solve inverse problems of technical diagnostics, the concept of Boolean difference [5] with respect to a logical variable in the expression of a Boolean function performed by a digital circuit is often used. The Boolean derivative expression is set to 1 Boolean derivative of a logical variable

$$\frac{df}{dx_i} = f(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n) \oplus f(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n) = 1 \quad (1)$$

defines the conditions under which the function f necessarily changes its value when the value of the variable x_i changes.

That is, equation (1) is a condition for significant dependence of the function f on the value x_i . The prospect of using a powerful Boolean derivatives apparatus for analyzing mathematical models in order to obtain maximum information about the technical state of a digital system is attractive.

In the reviewed works, there is no theoretical justification of the possibilities of using the mathematical apparatus of Boolean derivatives to construct verification tests for checking the serviceability of logical circuits that make up the basis of digital systems. Therefore, the purpose of this work is to substantiate the mathematical apparatus and develop the principles of calculating the conditions for detecting constant faults of arbitrary multiplicity in logic circuits of the Boolean basis. The proposed mathematical apparatus should be used to improve the security and reliability of digital systems of an uncertain technical condition.

Requirements for mathematical models of digital devices. Implicit mathematical models of diagnostic objects [1] are often used to solve problems of technical diagnostics, among which . In order to reduce the volume of calculations, the following requirements for the description of the investigated circuit of the logical device are natural:

- 1) ease of building a model based on the structural system of logical functions that describe the operation of a good logical circuit;
- 2) complete consideration of all possible constant irregularities;
- 3) minimal complexity of the mathematical model;
- 4) algorithmic simplicity of building models describing the operation of a working logic circuit as well as a circuit with malfunctions of arbitrary multiplicity;
- 5) absence of redundant parameters of the mathematical model;
- 6) suitability for computer processing.

Meeting such requirements ensures the maximum efficiency of mathematical model processing when solving technical diagnostics problems [6].

The process and example of building a mathematical model of this type is given in [7]. The mathematical model of the combination adder presented in [7] contains a system of generalized logical models of the structural system of Boolean functions, the output signals of which depend not only on the input x_i and internal y_j functional signals of the circuit, but also on the formal parameters α_l and β_k , which are intended for modeling constant faults on the corresponding buses of the scheme.

The used modeling method involves specifying for each line of the circuit the values of two fault parameters (PN), as given in system (2):

$$\tilde{x}_i = \alpha_l \cdot x_i \vee \beta_k = \left\{ \begin{array}{ll} x, \text{ good technical condition: } \alpha = 1, \beta = 0; \\ 1, \text{ defect } \equiv 1: & \alpha = 1, \beta = 1; \\ 0, \text{ defect } \equiv 0: & \alpha = 0, \beta = 0; \end{array} \right\}. \quad (2)$$

With this approach, the appearance of a single defect is simulated by a change in the value of one fault parameter compared to the good technical condition of the circuit. In order to simulate a double defect, it is necessary to change two parameters of the malfunction in the model of a working technical condition. In this way, the above requirements for the model number 4 and 6 are satisfied.

It is advisable to use this property of the proposed mathematical model to solve the inverse problem of technical diagnostics based on the following theoretical provisions.

Introduction to the mathematical apparatus of Boolean derivatives

The first-order Boolean derivative $\frac{df}{dx_i}$ of the Boolean function f on the variable x_i is calculated as follows [5]

$$\frac{df}{dx_i} = f(x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n) \oplus f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)$$

where: $f(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n)$ is a unit residual function obtained by substituting the constant 1 for x_i ,

$-f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)$ is a zero residual function obtained by substituting the constant 0 for x_i .

The Boolean derivative of $x_i = 0$ if f does not depend on x , the Boolean derivative of $x_i = 1$ if f depends only on x , i.e., the first-order Boolean derivative determines the conditions under which the function changes its value when the value of the variable x changes.

In other words, the expression of the Boolean derivative of a logical function by one of its arguments determines the conditions for the significant dependence of the specified function on this argument.

To analyze the significant dependence of the generalized vortex function on the fault parameters, it is proposed to calculate the Boolean derivative of the generalized output function by the fault parameter that models the appearance of a constant defect. To do this, the following concept of the Boolean derivative of the generalized output function by fault parameter can be introduced.

The concept of the Boolean derivative of a generalized output function.

For further presentation, it is advisable to introduce the following notation. All input variables of a logical function are denoted by the symbol of the generalized variable $\alpha_l (l = \overline{1, L})$, where $L = n + |A| + |B|$ is the total number of generalized variables equal to the sum of the number of n function arguments, the number $|A|$ of parameters of type α_j , the number $|B|$ of parameters of type β_p . The set of fault parameters should be called the technical condition vector, or TC vector, the coordinates of which are all the parameters of the circuit fault:

$$E = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{|A|}, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{|B|}). \quad (3)$$

The symbol E denotes a set of parameters on which the technical state of a logic circuit depends. In this case, the generalized variable α_l can be a real function variable, or it can be a fault parameter. With such notations, the generalized output function of a logic circuit is a dependency:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n, e_1, \dots, e_2, \dots, e_{|E|}).$$

Definition 1: The Boolean derivative of a generalized output function is the expression

$$\frac{d\tilde{f}}{d\alpha_i} = \tilde{f}(\alpha_1, \dots, \alpha_{i-1}, 1, \alpha_{i+1}, \dots, \alpha_{|L|}) \oplus \tilde{f}(\alpha_1, \dots, \alpha_{i-1}, 0, \alpha_{i+1}, \dots, \alpha_{|L|}). \quad (4)$$

The Boolean derivative of the generalized output function with respect to the parameter α_i is 0 if the generalized function \tilde{f} does not depend on α_i . The Boolean derivative with respect to α_i is 1 if the function depends only on α_i . Let the logical element conjunctor perform the function $z = x_1 \cdot x_2$. Taking into account possible constant faults, it is described by a generalized output function:

$$\tilde{z} = (x_1 \vee \beta_1) \cdot (x_2 \vee \beta_2) \cdot \alpha_1 \vee \beta_3. \quad (5)$$

or in terms of generalized variables:

$$\tilde{z} = (x_1 \vee \alpha_1) \cdot (x_2 \vee \alpha_2) \cdot \alpha_3 \vee \alpha_4.$$

The following notations are used here: $\alpha_1 = \beta_1, \alpha_2 = \beta_2, \alpha_3 = \alpha_1, \alpha_4 = \beta_3$.

According to definition (2), the equality of 1 of the Boolean derivative of a logical function with respect to any variable is a necessary and sufficient condition for the specified function to depend significantly on this variable. This means that a change in the value of the parameter α_i will necessarily cause a change in the value of the function. If x_i is an argument of the function z , then the Boolean difference dz/dx_i determines the significant dependence of the function z on the value of the argument x . If the

Boolean differential is calculated by the fault parameter α_i , then the Boolean derivative determines the significance of the defect modeled by this parameter for the original function z . Thus, for \tilde{z} to depend significantly on $\alpha_1 = \beta_1$, it is necessary and sufficient to fulfill the condition:

$$\frac{d\tilde{z}}{\alpha_1} = 1.$$

Taking into account (4), we obtain the following expression of the Boolean derivative of the generalized function \tilde{z} with respect to the generalized variable (fault parameter) β_1 :

$$\frac{d\tilde{z}}{\beta_1} = \overline{x_1} \cdot \alpha_1 \cdot \overline{\beta_3} (x_2 \vee \beta_2). \quad (6)$$

Let us determine under what conditions the parameter β_1 significantly affects the function \tilde{z} . In order for the generalized function \tilde{z} to significantly depend on the fault parameter β_1 , it is necessary to satisfy the following requirement:

$$\frac{d\tilde{z}}{\beta_1} = 1$$

The resulting expression of the Boolean derivative of the generalized function \tilde{z} in terms of the fault parameter β_1 can take the value 1 if the following conditions are met, as determined from (5):

- 1) the zero signal $x_1=0$ must be applied to the input of the connector;
- 2) parameter $\alpha_1=1$, i.e., the circuit has no $\equiv 0$ defect at the valve output;
- 3) parameter $\beta_3=0$, i.e. the circuit has no defect $\equiv 1$ at the valve output.
- 4) either set the signal $=1$ at input x_2 , or artificially create a constant defect in the circuit, the model of which is $\beta_2 = 1$.

This means that a defect $x_1 \equiv 1$ in the parameter β_1 distorts the output function z and can be identified (detected) when the functional conditions are met (the set $x_1 = 0, x_2 = 1$ is supplied to the inputs of the connector), where the output signal of the faulty element is 0. The second group of fault conditions describes the technical condition of the connector circuit, when the defect $x_1 \equiv 1$ in the parameter β_1 is manifested at the output. This state is described by the following values of the fault parameters: $\alpha_1=1, \beta_3=0$, i.e., there are no defects in the circuit for parameters α_1 and β_3 . This defines the technical conditions for the fault to occur.

Thus, the Boolean derivative of the generalized output function of a combination circuit by a variable or by a fault parameter formulates two types of conditions for the sensitivity of the circuit to changes in the value of the output signal: functional conditions (FC) define the input binary signals required for the defect to occur, and technical conditions (TC) define the technical state of the circuit under which the specified sensitivity is maintained and the fault signal is transported to the output of the circuit, where it can be observed.

In order to use these properties of generalized output functions to solve technical diagnostics problems, it is advisable to formulate several definitions and prove several statements that will allow more efficient solution of technical diagnostics problems of digital devices.

Boolean derivatives of generalized logic models.

Let the generalized logic model (GLM) of the Boolean function $F(X, E)$ [7] be given, where: $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ - n -dimensional vector of input logical variables (arguments) of the function F ;

$E = (e_1, e_2, \dots, e_{|E|})$ is a vector of the technical state of the circuit containing $|A|$ fault parameters α_j

$$(j=1, |A|) \text{ and } |B| \text{ fault parameters } \beta_q (q=1, |B|),$$

$$|E| = |A| + |B|.$$

Definition 2. The Boolean derivative of a generalized function \tilde{F} with respect to the parameter e_k is an expression:

$$\frac{d\tilde{F}}{de_k} = \tilde{F}(X, e_1, \dots, e_k, \dots, e_{|E|}) \oplus \tilde{F}(X, e_1, \dots, \overline{e_k}, \dots, e_{|E|}). \quad (7)$$

Since all e_k are Boolean parameters, and \tilde{F} is a Boolean function, all the properties of the Boolean difference $d\tilde{F}/dx_i$ are inherent in $d\tilde{F}/de_k$. The most important property of the Boolean derivative of the fault parameter is its inequality 0 if the expressions of the function \tilde{F} do not coincide at $e=0$ and $e=1$. If these expressions do coincide, then $\frac{d\tilde{F}}{de_k} = 0$, which means that \tilde{F} is independent of e_k .

Definition 3. The function $\tilde{F}(X, E)$ does not depend on the value of the parameter e_k if \tilde{F} does not change when the value of e_k is reversed, i.e. if

$$\tilde{F}(X, e_1, \dots, e_k, \dots, e_{|E|}) = \tilde{F}(X, e_1, \dots, \bar{e}_k, \dots, e_{|E|}).$$

Definition 2 can be expressed by the following theorem.

Theorem 1. For the ULM to be independent of the technical state of a digital device determined by the fault parameter e_k , it is necessary and sufficient to fulfill the following condition

$$\frac{d\tilde{F}}{de_k} = 0.$$

The proof of the theorem is based on the property $\tilde{F} \oplus \tilde{F} = 0$ and Definition 2. The dependence of \tilde{F} on the technical state of the logic circuit is described by the condition:

$$\frac{d\tilde{F}}{de_k} \neq 0.$$

In this case, we obtain the following consequences of Theorem 1.

Corollary 1. If.

$$\frac{d\tilde{F}}{de_k} = 0,$$

then the defect modeled by the parameter e_k is insignificant for the output function F .

Corollary 2. If.

$$\frac{d\tilde{F}}{de_k} = 1,$$

then the defect modeled by the parameter e_k is always significant for the output function F , and thus always detected at any values of the input vector X and the TS vector E .

Corollary 3. If.

$$\frac{d\tilde{F}}{de_k} = G(X), \quad (8)$$

then the defect modeled by the parameter e_k is significant for the output function F for any X_n for which $G(X_n) = 1$

Corollary 4. If.

$$\frac{d\tilde{F}}{de_k} = G(E), \quad (9)$$

then the defect modeled by the parameter e_k is significant for the output function F only at those values of the TS vector E_m for which $G(E_m) = 1$ regardless of the values of the input vector X .

Corollary 5. If.

$$\frac{d\tilde{F}}{de_k} = G(X, E), \quad (10)$$

then the fault modeled by the parameter e_k is significant for the output function F only in the technical states described by the TS vector E_m , and at such values of the input vector X_k for which $G(X_k, E_m) = 1$.

Thus, in general, to determine the significance of a certain variable or fault parameter for the generalized output function \tilde{F} , it is necessary to specify the vectors X and E . The vector X determines the values of the input variables x_i , and the vector E determines the values of the fault parameters (technical states of the circuit) at which the parameter e_k significantly affects the operation of the circuit.

Definition 4. The set of values X_k of the input variables at which the Boolean derivative of the generalized output function by e_k takes a single value is called the functional conditions (FC) of the significance of the parameter e_k for the output function.

Definition 5. The set of values E_m of the TS vector at which the Boolean derivative of the generalized output function by e_k takes a single value is called the technical conditions (TC) of the significance of the parameter e_k for the output function.

Summarizing the above, the following can be stated. The essentiality of the generalized variable \varkappa_l for the generalized output function \tilde{F} of the logic circuit is ensured by fulfilling the functional and technical conditions. These conditions are determined from the equality 1 of the Boolean derivative of the generalized function \tilde{F} of the circuit in terms of the generalized variable \varkappa_l :

$$\frac{d\tilde{F}}{d\varkappa_l} = 1$$

If we take the fault parameter as a generalized variable \varkappa_i , then equality 1 of expression (3) defines the conditions under which the defect modeled by the generalized parameter \varkappa_i distorts the output signal of the circuit.

Conclusions.

1. In the presented work, an extended concept of the Boolean derivative is proposed, namely, the concept of the Boolean derivative of the generalized output function of a digital combinational device is substantiated and formulated, which is represented by an optimized analytical description in the form of a generalized logic model (GLM). The used GMM is optimized in terms of complexity, redundancy, and algorithmic processing by computing tools [3].

2. It is proposed to use the mathematical apparatus of Boolean derivatives with respect to the generalized arguments of the GLM as a mathematical apparatus for calculating the significance of the arguments of the logical function being performed

$$\frac{d \tilde{F}}{d \varkappa}$$

3. As such arguments, the input signals of the logic circuit x_i that implements the function or the formal fault parameters e_k , which are introduced into the FEM and are intended to model constant circuit defects, can be used.

4. The definitions, theoretical prerequisites, analytical expressions, and the validity of the formulated statements about the effectiveness of using Boolean derivatives for the argument of the function x_i and the fault parameter e_k are given.

5. All variants of determining the conditions for the dependence of the GLM on the generalized parameters that determine the law of its functioning in the event of possible occurrence of constant-type defects are considered.

6. The proposed mathematical apparatus can be effectively used to solve inverse problems of technical diagnostics of digital devices described by logic circuits.

7. The conditions for checking the serviceability of a logic circuit determined by the proposed apparatus contain functional and technical conditions for detecting constant defects regardless of the multiplicity of faults present in the circuit, which allows building verification and diagnostic tests of digital information processing devices.

8. The use of the proposed apparatus makes it possible to increase the security of information processing in digital devices by increasing reliability by reducing the time of hardware recovery in the event of constant faults.

References

1. Fundamentals of technical diagnostics / V.V. Karibsky, P.P. Parkhomenko, E.S. Sogomonyan, V.F. Khalchev - Moscow: Energia, 1976. 464 p.
2. Kaznacheev V.I. Model of a digital automaton with faults. Izv. of the USSR Academy of Sciences. Ser. Techn. cybernetics, 1968, No. 6, pp. 55 - 62.
3. Krasnov, V.V.; Krulikovskiy, B.B. Mathematical modeling of combinational circuits with regard to possible faults. Hybrid computers and complexes. Issue 3. - Kyiv: Scientific thought. - 1980. - p.26 - 32.
4. Sklyarevich A.N., Sklyarevich F.A. Linear systems with possible changes - Riga: Zinatne, 1985.
5. Bessonov A.A. et al. Automation of construction of control tests. Edited by A.A. Bessonov. Л.: Energia, 1976. -224 с.
6. Krulikovsky B.B. Estimation of the complexity of generalized mathematical models of discrete devices. Integrated intelligent robotic systems (IIRTC-2011). Fourth International Scientific and Practical Conference, May 23-25, 2011, Kyiv, Ukraine (collection of abstracts) - K.: NAU, 2011. - pp. 316-318.
7. Krulikovskiy B.B. / Mathematical modeling of the combinational adder in the tasks of technical diagnostics. Krulikovskiy B.B., Reinskaya V.B. // Computer-integrated technologies: education, science, production. № 48. Lutsk, LNTU. - C.135-140. - 2022p.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-08>

УДК 517.97

Григор'єв Ю.О., к. фіз-мат. н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-7114-834X>

Одеський національний морський університет, м.Одеса, Україна

ЕКСТРЕМАЛЬНА ЗАДАЧА ДЛЯ ОПЕРАТОРА З ДВОМА ЯДРАМИ У ПРОСТОРАХ УЗАГАЛЬНЕНИХ ФУНКЦІЙ

Григор'єв Ю.О. Екстремальна задача для оператора з двома ядрами у просторах узагальнених функцій.

У статті розглядається екстремальна задача для оператора з двома ядрами у просторах узагальнених функцій. Наголошується, що за відсутності "регулярної" асимптотики модулів нулів (навіть якщо всі вони лежать на одному промені) поведінку функції передбачити важко. У ситуації, коли на нулі досліджуваного підкласу цілих функцій задані деякі обмеження, але будь-який "правильний" розподіл нулів відсутній, можна вирішувати тільки екстремальні задачі тих чи інших асимптотичних характеристик функцій заданого класу. Підкреслено, що актуальність розгляду узагальнених функцій зумовлений численними їх застосуваннями у таких важливих розділах комплексного аналізу, як проблеми повноти експонентних систем, теорія інтерполяції, теорія аналітичного продовження. Представлено екстремальну задачу знаходження функції для оператора з двома ядрами у просторах узагальнених функцій типу Соболева-Слободецького за відповідними умовами. Наголошується, що все інше, окрім поданого, у задачі задано. Розв'язок задачі подано у квадратурах. Розв'язок записано через проєкційні оператори та оператори перетворення Фур'є.

Позначивши вираз під модулем та врахувавши умови розв'язності рівняння у згортках з двома ядрами, сформовано дві задачі: екстремальну та задачу визначення функції за відповідними умовами. Де певним чином позначено множину функцій, для яких рівняння з двома ядрами є розв'язним з урахуванням додаткових умов задачі 2.

В роботі доведено, що задача 1 має єдиний розв'язок, цей розв'язок знайдено аналітично. Задача 2 є розв'язною. В образах Фур'є вона зводиться до задачі Рімана в узагальнених функціях. Розв'язок суттєво залежить від величини індексу рівняння з двома ядрами. Якщо індекс менше або дорівнює нулю, то екстремальна задача має єдиний розв'язок. Якщо індекс більше нуля, то розв'язок задачі Рімана не єдиний і залежить від довільних комплексних сталих. Цей розв'язок повинен задовольняти й додатковим умовам задачі 2. Отримано систему рівнянь з невідомими. Доведено, що якщо ранг цієї системи менше індексу, то загальний розв'язок екстремальної задачі залежить від результату віднімання від індексу рангу довільних комплексних сталих.

Ключові слова: екстремальна задача, розв'язання в квадратурах, оператори типу згортки, оператори з двома ядрами, перетворення Фур'є, задача Рімана теорії аналітичних функцій, узагальнені функції.

Hryhoriev Yu.O. Extreme problem for operator with two kernels in spaces of generalized functions. The article considers an extremal problem for an operator with two kernels in spaces of generalized functions. It is emphasized that in the absence of "regular" asymptotics of the modules of zeros (even if they all lie on the same ray), the behavior of the function is difficult to predict. In a situation where some restrictions are set on the zeros of the studied subclass of entire functions, but there is no "correct" distribution of zeros, only extreme problems of certain asymptotic characteristics of the functions of the given class can be solved. It is emphasized that the relevance of the consideration of generalized functions is due to their numerous applications in such important sections of complex analysis as the problems of completeness of exponential systems, the theory of interpolation, the theory of analytical continuation. The extreme problem of finding a function for an operator with two kernels in the spaces of generalized functions of the Sobolev-Slobodetsky type under appropriate conditions is presented. It is emphasized that everything else, except for the given one, is given in the problem. The solution of the problem is presented in squares. The solution is written in terms of projection operators and Fourier transform operators.

Denoting the expression under the modulus and taking into account the solvability conditions of the equation in convolutions with two kernels, two problems are formed: the extremal problem and the problem of determining the function under the appropriate conditions. Where is denoted in a certain way the set of functions for which the equation with two kernels is solvable subject to the additional conditions of problem 2.

The paper proves that problem 1 has a unique solution, this solution was found analytically. Problem 2 is solvable. In Fourier representations, it is reduced to the Riemann problem in generalized functions. The solution depends significantly on the value of the index of the equation with two kernels. If the index is less than or equal to zero, then the extremal problem has a unique solution. If the index is greater than zero, then the solution of the Riemann problem is not unique and depends on arbitrary complex constants. This solution must also satisfy the additional conditions of problem 2. A system of equations with unknowns is obtained. It is proved that if the rank of this system is less than the index, then the general solution of the extremal problem depends on the result of subtracting the rank of arbitrary complex constants from the index..

Key words: extremal problem, solution in quadratures, operators of convolution type, operators with two kernels, Fourier transform, Riemann problem of the theory of analytic functions, generalized functions.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями. У просторах функцій типу Соболева-Слободецького розглянута задача визначення функції $u(s)$ за умовами

$$\begin{cases} \int_0^{\infty} k_1(x-s)u_+(s)ds - \int_{-\infty}^0 k_2(x-s)u_-(s)ds - g(x) \in L_2(-\infty, +\infty), \\ \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x) \left| \int_0^{\infty} k_1(x-s)u_+(s)ds - \int_{-\infty}^0 k_2(x-s)u_-(s)ds - g(x) \right|^2 dx \rightarrow \min, \\ \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_j(x)u(x)dx = \gamma_j, \quad j = 1, \dots, N. \end{cases}$$

Всі інші величини задано. Розв'язок задачі існує при довільному цілому індексі оператора з двома ядрами. В образах Фур'є задачу зведено до задачі Рімана в узагальнених функціях та розв'язано в квадратурах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Деякі загальні постановки екстремальних задач

$$\begin{cases} \|Wu - g\| \rightarrow \min, \\ u \in \mathcal{A} \end{cases}$$

де приймають участь оператори типу згортки W , дано в роботі [1]. Ці екстремальні задачі у згортках часто зустрічаються у застосуваннях: до них зводяться чисельні задачі теорії імовірностей [2, с. 62], електротехніки [3], радіотехніки [4], теорії автоматичних систем [5, с. 203], економіки [6], конкретних напрямках математичної фізики [7]. Проте механізм вирішення екстремальної задачі з оператором типу згортки залишається вивченим не повною мірою та потребує детального опрацювання.

Формулювання цілей статті (постановка завдання).

Метою статті є знаходження розв'язку екстремальної задачі для оператора з двома ядрами у просторах узагальнених функцій.

Виклад основного матеріалу. У даній роботі вивчена екстремальна задача з оператором типу згортки виду

$$\begin{aligned} (Wu)(x) &= \int_{-\infty}^{+\infty} k_1(x-s)u_+(s)ds - \int_{-\infty}^{+\infty} k_2(x-s)u_-(s)ds, \\ u_+(x) &= \begin{cases} u(x), & x > 0, \\ 0, & x < 0, \end{cases} \quad u_-(x) = \begin{cases} u(x), & x > 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases} \end{aligned}$$

На шукану функцію $u(x)$ накладено обмеження

$$(\varphi_j(x), u(x)) = \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{\varphi_j(x)} u(x) dx = \gamma_j, \quad j = 1, \dots, M.$$

Розв'язок задачі будемо шукати у просторі функцій типу Соболева-Слободецького $L_2\{m; n\}$ [8, с. 261].

Нагадаємо, що простір $L_2\{m; n\}$ є спряженим до простору $L_2\{-m; -n\}$, що складається з функцій $\psi(x)$, $n (> 0)$ разів диференційовних і достатньо швидко спадаючих на нескінченності:

$$\|\psi\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| (x+i)^m \left(\frac{d}{dx} + 1 \right)^n \psi(x) \right|^2 dx.$$

Екстремальна задача розв'язна в квадратурах. Її розв'язок $u_{\pm}(x) \in L_2^{\pm}\{m;n\}$ [8, с. 369] записується через проєкційні оператори

$$(P^{\pm}\Psi)(x) = \frac{1}{2}\Psi(x) \pm \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Psi(t)dt}{t-x}$$

та оператори перетворення Фур'є

$$\Psi(x) = (V\psi)(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t)e^{itx} dt, \quad \psi(t) \in L_2(-\infty, +\infty).$$

Тут і далі великими літерами позначені образи Фур'є, а малими – оригінали. Якщо Ψ - узагальнена функція, то оператори

$$P^{\pm} : L_2\{0;m\} \rightarrow L_2^{\pm}\{0;m\},$$

$$V : L_2\{m;n\} \rightarrow L_2\{m;n\}$$

визначаються із наступних умов. Для довільної основної функції $\Phi(x)$

$$(P^{\pm}\Psi, \Phi(x)) = (\Psi, P^{\pm}\Phi(x)), \quad \Phi(x) \in L_2\{0;-m\},$$

$$(V\psi, \Phi(x)) = 2\pi(\psi, \varphi(x)), \quad \Phi(x) \in L_2\{-n;-m\}.$$

1. Постановка задачі. Знайти елементи $u_{\pm}(s) \in L_2\{m;n\}$ за умовами:

$$(Wu)(x) - g(x) \in L_2(-\infty, +\infty), \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x) |(Wu)(x) - g(x)|^2 dx \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \overline{\varphi_j(s)} u_-(s) ds = \gamma_j, \quad j = 1, \dots, p, \quad (3)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \overline{\psi_l(s)} u_+(s) ds = \delta_l, \quad l = 1, \dots, q. \quad (4)$$

Решта – задано:

$$g(x) \in L_2\{m;n\};$$

ядерні функції $k_j(x) \in L_2\{-m,1\}$ мають на зімкнутій осі m разів диференційовні образи Фур'є,

$$0 < c < |K_j(x)| < C < +\infty;$$

вагова функція $\rho(x)$ обмежена зверху і знизу додатними сталими;

γ_j і δ_l - задані комплексні числа;

$\varphi_j(x) \in L_2\{-m, -n\}$, $\psi_l(x) \in L_2\{-m, -n\}$, причому,
 $P^-\left((x+i)^n \Phi_j(x)\right)$ - лінійно незалежні функції простору $L_2^-\{0; -m\}$;
 $P^+\left((x-i)^n \Psi_l(x)\right)$ - лінійно незалежні функції простору $L_2^+\{0; -m\}$.

Не обмежуючи спільності, можна вважати, що функції $(x+i)^n \Phi_j(x)$ та $(x-i)^n \Psi_l(x)$ належать вказаним вище просторам.

До розв'язання задачі (1) – (4) можна застосувати наступний метод. Позначимо через \mathcal{M} множину тих і тільки тих елементів $v(x) \in \mathcal{M} \subset L_2(-\infty, +\infty)$ для яких задача знаходження $u_{\pm}(s) \in L_2\{m; n\}$ за умовами (3), (4) та

$$(Wu)(x) - g(x) = v(x) \tag{5}$$

розв'язна. В результаті, задачу (1) – (4) буде зведено до розв'язку двох задач: екстремальної задачі

$$\text{задача 1} \quad \begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x) |v(x)|^2 dx \rightarrow \min, \\ v(x) \in \mathcal{M} \end{cases}$$

та задачі визначення $u_{\pm}(x)$ за умовами (3) – (5):

$$\text{задача 2} \quad \begin{cases} (Wu)(x) - g(x) = v(x), \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{\varphi_j(s)} u_-(s) ds = \gamma_j, \quad j = 1, \dots, p, \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{\psi_l(s)} u_+(s) ds = \delta_l, \quad l = 1, \dots, q. \end{cases}$$

Наша мета – довести, що задача 1 має єдиний розв'язок $v(x)$, його можна знайти аналітично. В цьому випадку задача (2) розв'язна, її розв'язок суттєво залежить від величини індексу оператора W :

$$\chi = n + \text{Ind } K_2(x) - \text{Ind } K_1(x).$$

Далі, в пунктах 2 і 3, наведено розв'язки задачі 2 при $\chi < 0$ і при $\chi \geq 0$ відповідно. Ці розв'язки отримано стандартними методами [8] з використанням апарату перетворення Фур'є та наступної факторизації

$$\left(\frac{x-i}{x+i}\right)^{n-\chi} \frac{K_2(x)}{K_1(x)} = \frac{X^+(x)}{X^-(x)},$$

$$X^{\pm}(x) = \exp\left(\pm P^{\pm} \ln\left(\left(\frac{x-i}{x+i}\right)^{n-\chi} \frac{K_2(x)}{K_1(x)}\right)\right).$$

Із умов розв'язності задачі знайдемо співвідношення, яким повинні задовольняти елементи множини \mathcal{M} . На закінчення, у пункті 4, розв'яжемо екстремальну задачу 1.

2. Розв'язання задачі 2 при $\chi < 0$ запишемо в образах Фур'є

$$U^+(x) = (x+i)^n X^+(x) P^+ \frac{G(x)+V(x)}{(x+i)^n K_1(x) X^+(x)}, \quad (6)$$

$$U^-(x) = -(x-i)^n X^-(x) \left(\frac{x-i}{x+i}\right)^{-\chi} P^- \frac{G(x)+V(x)}{(x+i)^n K_1(x) X^+(x)}.$$

Умови розв'язності рівняння (6) мають вигляд

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \overline{Y_{p+q+j}(x)} V(x) dx = 2\pi\beta_{p+q+j}, \quad j = 1, \dots, |\chi|, \quad (7)$$

$$Y_{p+q+j}(x) = \frac{1}{(x-i)^{n+j} \overline{K_1(x) X^+(x)}} \in L_2\{-n; -m\}, \quad (8)$$

$$\beta_{p+q+j} = \frac{-1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{Y_{p+q+j}(x)} G(x) dx. \quad (9)$$

Для розв'язності задачі (2) потрібно вимагати виконання умов (3), (4). Підставляючи в ці умови (6), отримаємо

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \overline{Y_j(x)} V(x) dx = 2\pi\beta_j, \quad j = 1, \dots, p+q. \quad (10)$$

Тут

$$Y_j(x) = \frac{-P^- \left((x+i)^n \overline{\Phi_j(x) X^-(x)} \left(\frac{x+i}{x-i}\right)^{-\chi} \right)}{(x-i)^n \overline{K_1(x) X^+(x)}}, \quad j = 1, \dots, p, \quad (11)$$

$$Y_{p+l}(x) = \frac{P^+ \left((x-i)^n \overline{\Psi_l(x) X^+(x)} \right)}{(x-i)^n \overline{K_1(x) X^+(x)}}, \quad l = 1, \dots, q,$$

$$\beta_j = \gamma_j - \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{Y_j(x)} G(x) dx, \quad j = 1, \dots, p+q, \quad (12)$$

$$\gamma_{p+l} = \delta_l, \quad l = 1, \dots, q.$$

Справедливі наступні твердження.

Лема. Нехай $X^+(x)$ - аналітично продовжувана на верхню півплощину функція,

$$0 < c < |X^+(z)| < C < +\infty, \quad \text{Im } z \geq 0,$$

χ - ціле число. Тоді для довільної функції $\Psi(x) \in L_2(-\infty, +\infty)$ справедливі властивості

$$P^+ \left(\frac{1}{X^+(x)} P^+ \left(\overline{X^+(x)} \Psi(x) \right) \right) = P^+ \Psi(x), \quad (13)$$

$$P^- \left(\left(\frac{x-i}{x+i} \right)^{|\chi|} \frac{1}{X^+(x)} P^- \left(\left(\frac{x+i}{x-i} \right)^{|\chi|} X^+(x) \Psi(x) \right) \right) = P^- \Psi(x). \quad (14)$$

Доведення. Для довільного елемента $\Phi^-(x) \in L_2\{0;0\}$ будемо мати

$$\begin{aligned} & \left(\Phi^-(x), P^- \left(\left(\frac{x-i}{x+i} \right)^{|\chi|} \frac{1}{X^+(x)} P^- \left(\left(\frac{x+i}{x-i} \right)^{|\chi|} X^+(x) \Psi(x) \right) \right) \right) = \\ & = \left(\Phi^-(x), \left(\frac{x-i}{x+i} \right)^{|\chi|} \frac{1}{X^+(x)} P^- \left(\left(\frac{x+i}{x-i} \right)^{|\chi|} X^+(x) \Psi(x) \right) \right) = \\ & = \left(\left(\frac{x+i}{x-i} \right)^{|\chi|} \frac{1}{X^+(x)} \Phi^-(x), \left(\frac{x+i}{x-i} \right)^{|\chi|} X^+(x) \Psi(x) \right) = \\ & = (\Phi^-(x), \Psi(x)) = (\Phi^-(x), P^- \Psi(x)), \end{aligned}$$

що доводить властивість (14). Властивість (13) доводиться аналогічно.

Теорема 1. Функції $Y_j(x)$, $j = 1, \dots, p + q + [\chi]$ належать простору $L_2\{-n; -m\}$ та лінійно незалежні в цьому просторі.

Доведення. Перша частина теореми зрозуміла. Для доведення лінійної незалежності $Y_j(x)$ розглянемо рівність

$$\sum_{j=1}^{p+q+|\chi|} c_j Y_j(x) = 0. \quad (15)$$

Використовуючи (8), (11) і (15) отримаємо, що

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^p c_j P^- \left((x+i)^n \Phi_j(x) \overline{X^-(x)} \left(\frac{x+i}{x-i} \right)^{-\chi} \right) &= \sum_{j=1}^{|\chi|} \frac{c_{p+q+j}}{(x-i)^j}, \quad (16) \\ \sum_{j=1}^q c_{p+j} P^+ \left((x-i)^n \Psi_j(x) \overline{X^+(x)} \right) &= 0. \end{aligned}$$

Обидві частини рівності (16) помножимо на

$$\frac{1}{X^-(x)} \left(\frac{x-i}{x+i} \right)^{-\chi}$$

та подіємо оператором P^-

$$\sum_{j=1}^p c_j P^- \left((x+i)^n \Phi_j(x) \right) = 0.$$

В наслідок нашого припущення про лінійну незалежність елементів

$$P^- \left((x+i)^n \Phi_j(x) \right)$$

заключаємо,

$$c_1 = \dots = c_p = 0.$$

Звідси, та із (16) випливає, що

$$c_{p+q+1} = \dots = c_{p+q+|\chi|} = 0.$$

Рівність нулю решти коефіцієнтів

$$c_{p+1} = \dots = c_{p+q} = 0$$

доводиться аналогічно.

Виходить, що лінійна комбінація елементів

$$Y_j(x), \quad j = 1, \dots, p+q+[\chi]$$

дорівнює нулю тільки в одному випадку. Відтак, елементи лінійно незалежні. Теорему доведено.

Теорема 2. При $\chi < 0$ елемент $v(x) \in L_2(-\infty, +\infty)$ належить множині \mathcal{M} тоді і тільки тоді, якщо

$$\int_{-\infty}^{+\infty} y_j(x) v(x) dx = \beta_j, \quad j = 1, \dots, p+q+|\chi|. \quad (17)$$

Доведення випливає із умов (7) і (10), якщо їх записати в оригіналах Фур'є.

Розв'язання задачі 2 при $\chi \geq 0$. Відомо [8], що при $\chi > 0$ загальний розв'язок рівняння з двома ядрами (5) залежить від χ довільних комплексних сталих μ_1, \dots, μ_χ . В образах Фур'є розв'язок має вигляд

$$U^+(x) = (x+i)^n X^+(x) \left(P^+ \frac{G(x)+V(x)}{(x+i)^n K_1(x) X^+(x)} + \sum_{j=1}^{\chi} \frac{\mu_j}{(x+i)^j} \right), \quad (18)$$

$$U^-(x) = (x-i)^n X^-(x) \left(\frac{x+i}{x-i} \right)^{\chi} \left(-P^- \frac{G(x)+V(x)}{(x+i)^n K_1(x) X^+(x)} + \sum_{j=1}^{\chi} \frac{\mu_j}{(x+i)^j} \right).$$

Підставляючи (18) в умови (3) і (4), отримаємо лінійну систему $p+q$ алгебраїчних рівнянь з χ

невідомими $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_\chi)'$. Запишемо систему у матричному вигляді

$$\left[A^* \right]_{(p+q) \times \chi} \mu = 2\pi\beta - MV(x). \quad (19)$$

Тут $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_{p+q})'$,

$$MV(x) = \begin{pmatrix} \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{Y_1(x)} V(x) dx \\ \dots \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{Y_{p+q}(x)} V(x) dx \end{pmatrix}.$$

Елементи матриці $A_{\chi \times (p+q)}$ мають вигляд

$$a_{jl} = \begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Phi_l(x)(x+i)^n \overline{X^-(x)}}{(x-i)^j} \left(\frac{x-i}{x+i}\right)^{\chi} dx, & l = 1, \dots, p, \\ j = 1, \dots, \chi, \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Psi_{l-p}(x)(x-i)^n \overline{X^+(x)}}{(x-i)^j} dx, & l = p+1, \dots, p+q, \end{cases}$$

A^* - спряжена матриця.

Зауваження. Стовпці матриці A складені із лівих частин умов розв'язності задач визначення функцій $\Phi^{\pm}(x) \in L_2^{\pm}\{-n; -m\}$ за умовами:

$$\begin{aligned} \overline{K_1(x)}\Phi^+(x) - \overline{K_1(x)}\Phi_l(x) &= \overline{K_2(x)}\Phi^-(x), \quad l = 1, \dots, p, \\ \overline{K_1(x)}\Phi^+(x) - \overline{K_2(x)}\Psi_{l-p}(x) &= \overline{K_2(x)}\Phi^-(x), \quad l = p+1, \dots, p+q. \end{aligned}$$

Наша наступна задача – накласти на функцію $V(x)$ умови, необхідні і достатні для розв'язності рівнянь (19). Із лінійної алгебри відомо, що лінійна система алгебраїчних рівнянь розв'язна тоді і тільки тоді, коли вектор правої частини ортогональний кожному розв'язку

$\omega = (\omega_1, \dots, \omega_{p+q})'$ відповідної спряженої однорідної системи

$$A\omega = 0.$$

Якщо r - ранг матриці A , то однорідна система має $p+q-r$ лінійно незалежних розв'язків $\omega^{(l)}$, $l = 1, \dots, p+q-r$. Отже, для розв'язання рівнянь (19) необхідно і достатньо виконання наступних умов:

$$\langle \omega^{(l)}, MV(x) \rangle = 2\pi\alpha_l, \quad l = 1, \dots, p+q-r,$$

де

$$\alpha_l = \langle \omega^{(l)}, \beta \rangle = \sum_{j=1}^{p+q} \overline{\omega_j^{(l)}} \beta_j;$$

$$\begin{aligned} \left(M^* \omega^{(l)}, V(x) \right) &= 2\pi\alpha_l, \\ \left(\sum_{j=1}^{p+q} \omega_j^{(l)} Y_j(x), V(x) \right) &= 2\pi\alpha_l. \end{aligned} \quad (20)$$

Позначимо

$$W_l(x) = \sum_{j=1}^{p+q} \omega_j^{(l)} Y_j(x).$$

Теорема 3. Функції $W_l(x)$, $l = 1, \dots, p + q - r$ належать простору $L_2\{-n; -m\}$ та лінійно незалежні в цьому просторі.

Доведення витікає із лінійної незалежності векторів $\omega^{(l)}$ та функцій $Y_j(x) \in L_2\{-n; -m\}$. Лінійна незалежність функцій $Y_j(x)$, $j = 1, \dots, p + q$ у випадку $\chi \geq 0$ доводиться так само як і в теоремі 1.

Теорема 4. При $\chi \geq 0$ елемент $v(x) \in L_2(-\infty, +\infty)$ належить множині \mathcal{M} тоді і тільки тоді, якщо

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \overline{w_l(x)} v(x) dx = \alpha_l, \quad l = 1, \dots, p + q - r. \quad (21)$$

Доведення випливає із умов (20), якщо їх записати в оригіналах Фур'є.

4. Розв'язання задачі 1. В усіх випадках величини індексу χ , екстремальна (1) – (4) зведена до задачі 1. Згідно з теоремами 2 і 4 задача 1 зводиться в знаходженні функції $v(x) \in L_2(-\infty, +\infty)$ за умовами

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{\rho(x)} |v(x)|^2 dx \rightarrow \min, \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{\zeta_j(x)} v(x) dx = \sigma_j, \quad j = 1, \dots, N. \end{cases} \quad (22)$$

Тут $\zeta_j(x)$ - відомі лінійно незалежні функції простору $L_2(-\infty, +\infty)$; σ_j - задані комплексні числа.

У випадку $\chi < 0$

$$\zeta_j(x) = y_j(x), \quad \sigma_j = \beta_j, \quad N = p + q + |\chi|.$$

У випадку $\chi \geq 0$

$$\zeta_j(x) = w_j(x), \quad \sigma_j = \alpha_j, \quad N = p + q - r.$$

Задачу (22) можна розв'язати за методом Лагранжа. Розв'язок існує та єдиний

$$v(x) = -\sum_{j=1}^N \lambda_j \frac{\zeta_j(x)}{\rho(x)}.$$

Множники Лагранжа λ_j визначаються із системи алгебраїчних рівнянь

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\overline{\zeta_l(x)} \zeta_j(x)}{\rho(x)} dx = -\sigma_l, \quad l = 1, \dots, N.$$

Визначником цієї системи є визначник Грама, складений із лінійно незалежних елементів $\zeta_j(x) / \sqrt{\rho(x)}$. Тому система має єдиний розв'язок.

Висновки із цього дослідження і дальші перспективи в цьому напрямку

Теорема 5. Екстремальна задача (1) – (4) розв'язна в усіх випадках величини індексу χ .

При $\chi < 0$ розв'язок єдиний і виражається в образах Фур'є формулами (6).

При $\chi \geq 0$ розв'язок має образи Фур'є (18). Коефіцієнти μ_j , $j = 1, \dots, \chi$, що входять у (18), можна знайти із лінійної системи алгебраїчних рівнянь (19). Якщо $\chi > 0$, а $r < \chi$, то коефіцієнти μ_j та загальний розв'язок задачі (1) – (4) залежать від $\chi - r$ довільних комплексних сталих.

Як окремий випадок задачі (1) – (4), відзначимо задачу без додаткових умов (3), (4):

$$\begin{cases} (Wu)(x) - g(x) \in L_2(-\infty, +\infty), \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x) |(Wu)(x) - g(x)|^2 dx \rightarrow \min. \end{cases} \quad (23)$$

Зрозуміло, що при $\chi \geq 0$ ця екстремальна задача стає тривіальною та зводиться до розв'язання рівняння з двома ядрами [8, с. 272]. При $\chi < 0$ задача має єдиний розв'язок. Цей розв'язок можна знайти із формул (6), поклавши $p = q = 0$.

Приклад. Визначити функції $u_{\pm}(x) \in L_{2\pm}\{1; 0\}$ за умовами (23), де $\rho(x) = 1$, $g(x) = 1$, а

$$(Wu)(x) = u_+(x) - 2 \int_0^x e^{s-x} u_+(s) ds - u_-(x).$$

В цьому прикладі $\chi = -1$. Допоміжні задачі 1 і 2 мають вигляд

$$\text{задача 1} \quad \begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} |v(x)|^2 dx \rightarrow \min, \\ \int_0^{+\infty} e^{-x} v(x) dx = -1, \end{cases}$$

$$\text{задача 2} \quad (Wu)(x) - 1 = v(x).$$

Розв'язуючи послідовно задачу 1

$$v(x) = \begin{cases} -2e^{-x}, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

і задачу 2, ми знайдемо розв'язок даного прикладу:

$$u_+(x) = \begin{cases} -1, & x > 0, \\ 0, & x < 0, \end{cases} \quad u_-(x) = \begin{cases} 0, & x > 0, \\ -1, & x < 0. \end{cases}$$

Перспективами подальших досліджень за темою є розгляд ситуації коли інтегральне рівняння з двома ядрами у згортках не має розв'язків, формуванню наближеного чисельно-аналітичного розв'язку такої задачі.

Автор висловлює подяку своєму вчителю, професору Ю.І. Черському, за постановку екстремальних задач у згортках.

Список бібліографічного опису

1. Черский Ю.И. Экстремальные краевые задачи теории аналитических функций. Докл. АН УССР. Сер. А, 1985. № 10. С. 18-21.
2. Вентцель А.Д. Курс теории случайных процессов. М.: Наука, 1975. 319 с.
3. Крейн М.Г., Нудельман П.Я. Аппроксимация функций из $L_2(\omega_1, \omega_2)$ передаточными функциями линейных систем с минимальной энергией. Проблемы передачи информации, 1975. Т. XI, вып. 2. С. 37-60.
4. Гуткин Л.С. теория оптимальных методов радиоприема при флуктуационных помехах. Изд. второе. – М.: Советское радио, 1972. 448 с.
5. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. М.: Наука, 1978. 296 с.
6. Постан М.Я. Економико-математические модели смешанных перевозок. Одесса, "Астропринт", 2006. 376 с.
7. Kh. A. Khachatryan, A. R. Hakobyan, "On nontrivial solvability of one class of nonlinear integral equations with conservative kernel on the positive semi-axis", Уч. записки ЕГУ, сер. Фізика і Математика, 2022. 56:1. С.7–18.
8. Гахов Ф.Д., Черский Ю.И. Уравнения типа свёртки. М.: Наука, 1978. 296 с.

References

1. Cherskij Yu.I. Ekstremalnye kraevye zadachi teorii analiticheskikh funkciy. Dokl. AN USSR. Ser. A, 1985. № 10. S. 18-21.
2. Ventcel A.D. Kurs teorii sluchajnyh processov. M.: Nauka, 1975. 319 s.
3. Krejn M.G., Nudelman P.Ya. Approksimaciya funkciy iz peredatochnymi funkciyami linejnyh sistem s minimalnoj energiej. Problemy peredachi informacii, 1975. T. XI, vyp. 2. S. 37-60.
4. Gutkin L.S. teoriya optimalnyh metodov radiopriema pri fluktuacionnyh pomehah. Izd. vtoroe. M.: Sovetskoe radio, 1972. 448 s.
5. Cypkin Ya.Z. Osnovy teorii avtomaticheskikh sistem. M.: Nauka, 1978. 296 s.
6. Postan M.Ya. Ekonomiko-matematicheskie modeli smeshannyh perevozok. Odessa, "Astroprint", 2006. 376 s.
7. Kh. A. Khachatryan, A. R. Hakobyan, "On nontrivial solvability of one class of nonlinear integral equations with conservative kernel on the positive semi-axis", Uch. zapiski EGU, ser. Fizika i Matematika, 2022. 56:1. S. 7–18.
8. Gahov F.D., Cherskij Yu.I. Uravneniya tipa svyortki. M.: Nauka, 1978. 296 s.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-09>

УДК 004:51:378(045)

Гусак Людмила Петрівна, канд. пед. наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-0022-9644>

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

Левчук Олена Володимирівна, канд. пед. наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0001-5046-2367>

Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна

Гринчук Тетяна Петрівна, канд. екон. наук

<https://orcid.org/0000-0002-0008-4764>

Вінницький кооперативний інститут, м. Вінниця, Україна

ЗНАЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МАТЕМАТИКИ У ФОРМУВАННІ ЦИФРОВИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ МАЙБУТНІХ ЕКОНОМІСТІВ

Гусак Л.П., Левчук О.В., Гринчук Т.П. Значення комп'ютерної математики у формуванні цифрових компетентностей майбутніх економістів. В статті розкрито особливості практичного застосування комп'ютерних математичних систем в процесі формування цифрових компетентностей економістів. Обґрунтовано, що використання цих програм в освітньому процесі закладу вищої освіти сприяє формуванню у студентів знань, умінь та навичок у галузі як математики, так і інформатики; підтримці мотивації застосування інформаційних технологій у професійній діяльності; розвитку наочного, інтуїтивного, теоретичного мислення, естетичного сприйняття математичних об'єктів, умінь здійснювати експериментальну діяльність. В результаті використання системи комп'ютерної математики у професійній підготовці в майбутнього фахівця у галузі економіки формується компетентність у сфері застосування інформаційних технологій у професійній діяльності. Запропоновані приклади застосування програмних пакетів MS Excel та Mathcad для розв'язування економічних задач.

Ключові слова: комп'ютерні математичні системи, цифрова компетентність економістів, математична підготовка, фахова підготовка студентів, спеціальне програмне забезпечення.

Husak L.P., Levchuk O.V., Hrynychuk T.P. The value of computer mathematics in the formation of digital competences for future economists. The article shows the peculiarities of the computer mathematical systems practical application in the process of forming the digital economists' competences. It is substantiated that the usage of these programs in the educational process of a higher education institution contributes to the formation of students' knowledge, abilities and skills in the field of both mathematics and computer science; supporting the motivation of using information technologies in professional activities; development of visual, intuitive, theoretical thinking, aesthetic perception of mathematical objects, ability to carry out experimental activities. As a result of the computer mathematics system usage in professional training, competence in the field of information technologies application in professional activity is formed in the future specialist in the field of economics. Proposed examples of the use of MS Excel and Mathcad software packages for solving economic problems.

Key words: computer mathematical systems, digital competence of economists, mathematical training, professional training of students, special software.

Постановка наукової проблеми. Швидкий розвиток сучасного світу, цифровізації суспільства, інтеграції країн до загальносвітового інформаційного середовища, що викликано глобальним розвитком технологій, а також загострення економічних проблем всередині кожної держави, потребує формування цифрових компетентностей майбутніх економістів ще на етапі вивчення математичних дисциплін. Сучасний інформаційний простір включає не лише особисту освіту чи спілкування, а повністю переноситься на ділові сфери та робочі процеси. Вміння працювати та швидко орієнтуватись в цифровому середовищі, що постійно удосконалюється та оновлюється, дозволить майбутнім економістам завжди вчасно отримувати інформацію, аналізувати її та приймати правильні бізнес-рішення [6].

Існуюча на сьогодні практика підготовки економістів в Україні призводить до парадоксу, за якого на ринку багато дипломованих економістів низького рівня конкурентоспроможності, що не можуть задовольнити потреби суспільства. [2]. Необхідно провести ряд заходів з формування професійно компетентних випускників через професійну підготовку у сфері економічної освіти з використанням всіх сучасних цифрових та інформаційно-комунікаційних технологій [4]. Навчання цифровим компетентностям на базі математичних дисциплін дозволить якісно виконувати облік господарських процесів, проводити аналітичну роботу та планування результатів діяльності.

Професійна підготовка майбутніх економістів має розвивати не лише навички підприємництва та комунікацій, а перш за все здатність орієнтуватись в цифрових потоках, отримувати статистичну та звітну інформацію в різних вибірках, робити прогнози, використовувати сучасні швидкі методи

Аналіз досліджень. Серед основних документів, визначаючих тему дослідження, варто відзначити: Національну доктрину розвитку освіти України у XXI столітті, Концепцію розвитку економічної освіти в Україні, Національну стратегію розвитку освіти в Україні на 2022–2032 рр., Закон України «Про вищу освіту» та ін.

Серед вітчизняних дослідників увагу розвитку цифрових компетентностей майбутніх економістів приділяли: Кримова М.О. [7], Кубанов Р. [8], Наугольникова О.М. [10], Поясок Т.Б. [11], а також закордонні автори: Bawden D., Calvani A., Livingstone S., Martin A., Sefton-Green J. та ін.

Всі вони звернули особливу увагу на використання інформаційно-комп'ютерних технологій як однієї з найважливіших компетенцій фахівця економічного профілю. При цьому проблема формування цифрових компетентностей економістів залишається досить гострою та потребує подальшого розгляду в контексті вивчення математичних дисциплін.

Мета статті. Метою статті є дослідити вплив комп'ютерних математичних систем на формування цифрової компетентності майбутнього фахівця в галузі економіки.

Виклад основного матеріалу. Розглянувши подані в публікаціях твердження, можна визначити цифрову компетентність, як набір здібностей, знань, умінь, навичок, необхідних майбутньому економісту для ефективного використання інформаційно-комп'ютерних технологій та цифрових медіа з метою виконання поставлених задач, комунікації, взаємодії, спілкування, створення і поширення контенту для роботи, навчання та дозвілля. Сучасний фахівець має володіти всіма необхідними навичками для якісної роботи в технологічному та інформаційному середовищі – обмінюватися інформацією з колегами, партнерами, керівництвом. Потрібно швидко аналізувати та групувати дані, робити висновки. Все це можливо, лише за умов знання математики та різних методів обчислень економічних процесів, управління фінансами, бухгалтерського обліку.

Відповідно до стандарту вищої освіти України (спеціальність: 051 «Економіка», бакалаврський рівень) [12], майбутні економісти повинні мати навички використання комп'ютерних технологій та програмного забезпечення для вирішення економічних завдань, аналізу даних і підготовки аналітичних звітів, а також використовувати економіко-математичні методи та моделі для вирішення економічних задач – все це у контексті фахових, предметних компетентностей.

При цьому майбутні економісти повинні бути готовими до постійного розвитку своїх професійних компетентностей, в тому числі й цифрових, протягом усього життя [1].

Враховуючи, що методи аналізу економічних процесів та навчання математики мають багато спільного, студенти – майбутні економісти при вивченні математики та дисциплін циклів загальної та професійної підготовки мають опанувати наступні інтелектуальні вміння та їх складові:

- уміння вирішувати завдання (постановка питання, виділення потрібної інформації, аналіз проблемної ситуації, висунення гіпотези);
- здатність до математичного моделювання (визначення даних, умов та меж пошуку рішень, переклад проблеми на мову математики, застосування адекватного математичного апарату, інтерпретація рішення);
- вміння логічно мислити (дедуктивні та індуктивні висновки, комбінація логіки та інтуїції, виведення аргументу для висновку та висновків).

Спеціальне програмне забезпечення, одержує нині дедалі ширше застосування для розв'язування математичних завдань – це системи комп'ютерної математики, які є комплексами взаємозалежних прикладних програм, і системних засобів, дозволяють вирішувати завдання математичного змісту.

До систем комп'ютерної математики відносять такі групи програмних систем: системи чисельних розрахунків; табличні процесори; спеціалізовані математичні пакети (у тому числі статистичні та економетричні); програми побудови графіків функцій; універсальні математичні системи.

З перелічених програмних засобів особливий інтерес становлять універсальні математичні системи. Вони включають більшість функцій інших програмних систем, крім того, містять власні, унікальні можливості, які можна ще розширювати завдяки вбудованим мовам програмування.

Їх відмінними рисами є:

- наявність коштів щодо чисельних розрахунків;
- можливість символічних (аналітичних) обчислень практично з усіх розділів математики;
- можливість побудови різноманітних графіків;
- наявність засобів для створення науково-технічних документів;

- можливість інтеграції з іншими програмними системами.

Спеціалізовані навчальні програми, побудовані на базі математичних дисциплін, допомагають змоделювати для майбутніх економістів бізнес-процеси, вправляться у виконанні фінансових та аналітичних операцій, ведення обліку та формуванні звітів. Сучасні цифрові технології широко застосовуються в бізнесі і впливають не тільки на його організацію та облік, реалізацію товарів і послуг, а й значною мірою дозволяють регулювати доходність і витрати та прогнозувати прибуток, що є основною метою економічної діяльності.

Для виконання професійних завдань майбутнім економістам доцільно мати навички використання наступних програмних засобів:

- Текстові редактори (Google Docs, WordPad, MS Word);
- Табличні процесори (MS Excel, OpenOffice Calc, Google Tabs);
- Математичні застосунки (Photomath, Mathway, Mathpix);
- Застосунки для математичного моделювання (MathCad, MatLab);
- Графічні програми (Adobe Photoshop, Adobe Illustrator, Corel Draw);
- Мультимедійні презентації (MS PowerPoint, Google Slides);
- Програми фінансів, обліку та аналізу (Дебет Плюс, GrossBee, iFin, ISpro, Парус, АРМ «Фінансовий аналіз», «ЕДП»);
- FOCCAL, Project Expert);
- Мережеві браузеры (Google Chrome, Mozilla Firefox, Internet Explorer).

Розглянемо приклади застосування деяких вказаних програмних засобів для розв'язування задач з економіки.

Табличний процесор MS Excel застосовується не тільки як потужний калькулятор для проведення розрахунків, а й дозволяє швидко й ефективно розв'язувати складні економічні задачі, які мають практичне значення. На сьогодні програмне середовище MS Excel є однією з найбільш популярних і зручних програм, які призначені для роботи з електронними таблицями, отже, воно є звичним робочим середовищем для сучасного фахівця в галузі економіки та управління.

Наприклад, на фінансовому ринку представлені акції трьох видів. Норма прибутку акцій залежить від ринкової кон'юнктури (%). Проаналізувати ситуацію і вибрати тип акції найбільш привабливої для інвестора з точки зору міри її ризику. За величину ризику прийняти коефіцієнт варіації.

Види	Оцінка можливого результату					
	Песимістична		Стримана		Оптимістична	
	Прибуток X_{1i}	Ймовірність P_{1i}	Прибуток X_{2i}	Ймовірність P_{2i}	Прибуток X_{3i}	Ймовірність P_{3i}
A	59	0,25	29	0,53	19	0,22
B	49	0,3	39	0,45	29	0,25
C	39	0,27	19	0,5	19	0,23

Запропонуємо спосіб організації обчислень прикладу засобами MS Excel. Для обчислення математичного очікування можна застосувати функцію СУММПРОИЗВ (массив 1; массив 2; ...), яка надасть можливість знайти суму добутків значень випадкової величини та відповідних імовірностей. Для обчислення дисперсії використовують функцію КОРЕНЬ (число), яка повертає значення квадратного кореня від заданого числа.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
1	A						=СУММПРОИЗВ(B2:D2;B3:D3)					=B2^2*B3+C2^2*C3+D2^2*D3-F2^2						
2	x_i	59	29	19	$M(X_A) =$	34,3				$V(X_A) =$	218,9					$\sigma(X_A) =$	14,8	
3	p_i	0,25	0,53	0,22			=СУММПРОИЗВ(B5:D5;B6:D6)											
4	B																	
5	x_i	49	39	29	$M(X_B) =$	39,5				$V(X_B) =$	54,75						$\sigma(X_B) =$	7,399
6	p_i	0,3	0,45	0,25			=СУММПРОИЗВ(B8:D8;B9:D9)											
7	C																	
8	x_i	39	29	19	$M(X_C) =$	29,4				$V(X_C) =$	49,84						$\sigma(X_C) =$	7,06
9	p_i	0,27	0,5	0,23														
10							=Q2/F2											
11					$CV(X_A) =$	0,431				$CV(X_B) =$	0,187						$CV(X_C) =$	0,24

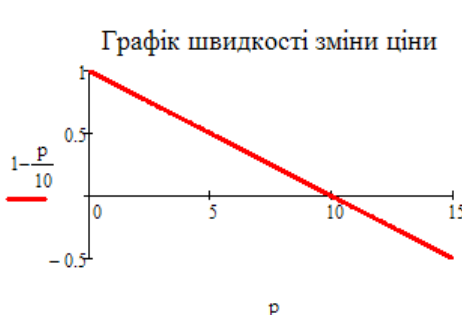
Отже, потрібно вибрати акцію виду B, оскільки для неї коефіцієнт варіації, тобто ризик, найменший [3].

Пакет Mathcad є потужною системою комп'ютерної математики, що поєднує візуально орієнтовану вхідну мову, зручний редактор тексту і формул, чисельний і символічний процесори. Пакет досить простий у вивченні, а наявність великої кількості електронних книг та «швидких шпаргалок» суттєво спрощує його застосування для вирішення конкретних професійних завдань.

Наприклад, фірма реалізує свою продукцію з тижневими перервами, при цьому початкова ціна становить 15 грн за кілограм. Визначити умови рівноваги на ринку, якщо попит Q та пропозиція S задані наступними функціями: $Q = 4p' - 2p + 39$; $S = 44p' + 2p - 1$, де p – ціна на продукцію; p' – миттєва швидкість зміни ціни (тенденція зміни ціни).

Вбудовані в Mathcad функції solve та Odesolve дозволяють розв'язати рівняння відносно p' , отримати графіки похідної функції ціни p та розв'язку диференціального рівняння.

Знайдемо умови рівноваги, прирівнявши попит і пропозицію та розв'язавши відповідне рівняння відносно p' :

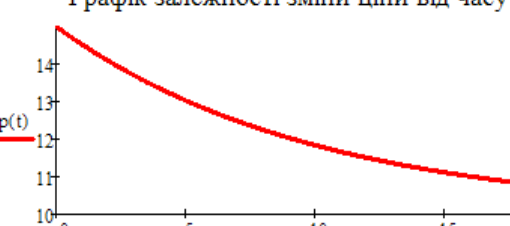
$$4p' - 2p + 39 - (44p' + 2p - 1) \text{ solve, } p' \rightarrow 1 - \frac{p}{10}$$


Графік швидкості зміни ціни

Враховуючи початкові умови, з допомогою вбудованої функції Odesolve будемо графік розв'язку диференціального рівняння:

Given

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{10 - p(t)}{10} \quad p(0) = 15$$

$$p := \text{Odesolve}(t, 20)$$


Графік залежності зміни ціни від часу

Гра...

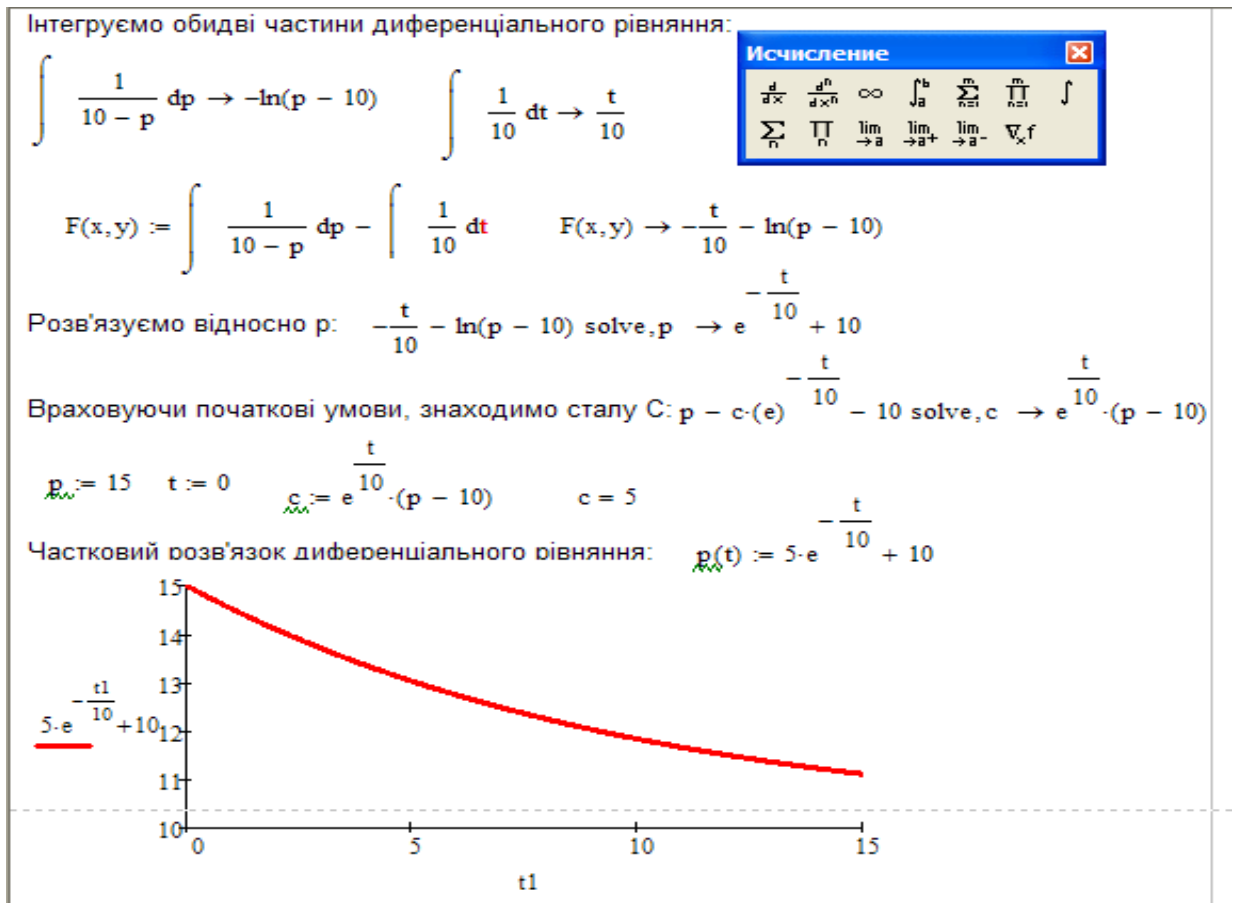
Вставка функції

Категория функции	Имя функции
Поиск	Odesolve
Преобразование Фурье	Pdesolve
Преобр-я небольшой волны	Radau
Распределение вероятностей	relax
Решение	Rkadapt
Решение диф. уравнений	rkfixed
Случайные числа	sbval
Сортировка	statespace
Специализи...	stiff

Odesolve([vf], x, b, [step])

Выдает функцию или вектор функций x, представляющий решения системы уравнений полного дифференциала в решающем блоке. vf опущена при решении единственной ODE.

Mathcad дозволяє також простежити хід розв'язування диференціального рівняння. У цьому випадку використовуємо інструменти інтегрування, розв'язування рівнянь та побудови графіка функції.



До того ж, створена математична модель в Mathcad дає можливість дослідити залежність розв'язку від початкових умов. Тобто проаналізувати вплив початкової ціни на характер її зміни в майбутньому [9].

Як бачимо, в системі Mathcad присутній потужний математичний апарат, який містить стандартні математичні функції (матричне, диференціальне, інтегральне числення; численне розв'язування диференціальних рівнянь; деякі статистичні функції). Завдяки цьому принцип випередження навчання реалізується в можливості студентів розв'язувати завдання, що потребують тих математичних знань, які ще не розглядалися, використовувати систему на старших курсах та в майбутній професійній діяльності, коли в арсеналі фахівця лише залишкові знання з математики [5].

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Програмні продукти, створені на базі математичних методів, дозволяють імітувати майбутню професійну діяльність економістів за допомогою моделювання економічних об'єктів, складання реальних професійних задач, зведення статистичних даних, розробки бізнес-планів, складання звітів та ін.

Студенти навчаються не лише користуватись програмами в роботі, а й розуміти значення процесів, порівнювати результати та вирішувати професійні завдання найоптимальнішими шляхами.

Розуміючи, як математичні процеси виконуються програмно, та як швидко можна обробити великий масив даних, майбутні економісти формують професійні компетентності, які стануть ключовими у реальній професійній діяльності. Розвиток цифрових компетентностей має починатись з математичних дисциплін під час фахової підготовки студентів та продовжуватись в подальшому у вигляді самоосвіти та використання сучасних цифрових технологій, які сьогодні максимально впроваджуються в мобільних пристроях і можуть використовуватись без прив'язки до робочого місця, офісу чи країни.

Список бібліографічних посилань

1. Акулєнко К. Ю. Підготовка майбутніх економістів з використанням засобів інформаційних технологій (2011). Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. № 3. С. 4-10.
2. Вітер С. Вимоги до майбутніх фахівців економічного профілю у контексті підготовки для аграрної сфери (2012). Молодь і ринок. № 6. С. 140-145.

3. Гулівата І.О., Гусак Л.П., Радзіховська Л.М. Вища та прикладна математика: теорія ймовірностей: навч. посібник (2018), 208 с.
4. Гура А. О. Сучасні тенденції розвитку економічної освіти в Україні (2016). *Модернізація структури та змісту економічної освіти на засадах компетентнісного підходу: наук.-метод. семінар викл. екон. ф-ту ХНПУ ім. Г. С. Сковороди*. Харків. С. 10-14.
5. Гусак Л.П., Левчук О.В. Принципи впровадження системи Mathcad в математичну підготовку фахівців аграрного сектору (2017). *Економіка. фінанси. менеджмент: актуальні питання науки і практики*. Вип. 10(26). С. 79-89.
6. Івашко Л. М. Використання інформаційно-комунікаційних технологій для оцінювання компетенцій при підготовці економістів (2012). *Вісник соціально-економічних досліджень*. Вип. 44 (1). С. 196-201.
7. Кримова М. О. Оцінка конкурентоспроможності молодих фахівців з економічною освітою на ринку праці України (2015). *Демографія та соціальна економіка*. № 2. С. 53-64.
8. Кубанов Р. Вимоги до професійної підготовки фахівців економічних спеціальностей та їх реалізація в освітньому процесі вищого навчального закладу (2014). *Науковий вісник Мелітопольського державного педагогічного університету*. № 2. С. 294-301.
9. Левчук О.В. Математичне моделювання на базі Mathcad як засіб формування професійної компетентності майбутніх економістів (2019). *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. № 5. С. 73-83.
10. Наугольнікова О. М. Система професійної підготовки майбутніх економістів у США (2016). *Педагогіка та психологія*. Вип. 52. С. 291-301.
11. Поясок Т. Б. Система застосування інформаційних технологій у професійній підготовці майбутніх економістів: монографія (2009), 348 с.
12. Про затвердження стандарту вищої освіти за спеціальністю «Економіка» для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти: Наказ Міністерство освіти і науки України від 19 листопада 2018 р. № 1260. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/vishcha-osvita/zatverdzeni%20standarty/12/21/071-oblik-iopodatkuвання-bakalavr.pdf>.

References

1. Akulenko K. YU. Pidhotovka maybutnikh ekonomistiv z vykorystanniam zasobiv informatsiynykh tekhnolohiy (2011). *Komp'yuterno-intehrovani tekhnolohiyi: osvita, nauka, vyrobnytstvo*. № 3. S. 4-10.
2. Viter S. Vymohy do maybutnikh fakhivtsiv ekonomichnoho profilu u konteksti pidhotovky dlya ahrarnoyi sfery (2012). *Molod' i rynek*. № 6. S. 140-145.
3. Hulivata I.O., Husak L.P., Radzikhov's'ka L.M. Vyshcha ta prykladna matematyka: teoriya ymovirnostey: navch. posibnyk (2018), 208 s.
4. Hura A. O. Suchasni tendentsiyi rozvytku ekonomichnoyi osvity v Ukrayini (2016). *Modernizatsiya struktury ta zmistu ekonomichnoyi osvity na zasadakh kompetentnisnoho pidkhodu: nauk.-metod. seminar vykl. ekon. f-tu KHNPU im. H. S. Skovorody*. Kharkiv. S. 10-14.
5. Husak L.P., Levchuk O.V. Prynysy vprovadzhennya systemy Mathcad v matematychnu pidhotovku fakhivtsiv ahrarnoho sektoru (2017). *Ekonomika. finansy. menezhment: aktual'ni pytannya nauky i praktyky*. Vyp. 10(26). S. 79-89.
6. Ivashko L. M. Vykorystannya informatsiyno-komunikatsiynykh tekhnolohiy dlya otsinyuvannya kompetensiy pry pidhotovtsi ekonomistiv (2012). *Visnyk sotsial'no-ekonomichnykh doslidzhen'*. Vyp. 44 (1). S. 196-201.
7. Krymova M. O. Otsinka konkurentospromozhnosti molodykh fakhivtsiv z ekonomichnoyu osvitoyu na rynku pratsi Ukrainy (2015). *Demohrafiya ta sotsial'na ekonomika*. № 2. S. 53-64.
8. Kubanov R. Vymohy do profesiyanoi pidhotovky fakhivtsiv ekonomichnykh spetsial'nostey ta yikh realizatsiya v osvith'omu protsesi vyshchoho navchal'noho zakladu (2014). *Naukovyy visnyk Melitopol's'koho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu*. № 2. S. 294-301.
9. Levchuk O.V. Matematyчне modelyuvannya na bazi Mathcad yak zasib formuvannya profesiyanoi kompetentnosti maybutnikh ekonomistiv (2019). *Ekonomika, finansy, menezhment: aktual'ni pytannya nauky i praktyky..* № 5. S. 73-83.
10. Nauhol'nykova O. M. Systema profesiyanoi pidhotovky maybutnikh ekonomistiv u SSHA (2016). *Pedahohika ta psykholohiya*. Vyp. 52. S. 291-301.
11. Poyasok T. B. Systema zastosuvannya informatsiynykh tekhnolohiy u profesiynoi pidhotovtsi maybutnikh ekonomistiv: monohrafiya (2009), 348 s.
12. Pro zatverdzhennya standartu vyshchoyi osvity za spetsial'nisty «Ekonomika» dlya pershoho (bakalavrs'koho) rivnya vyshchoyi osvity: Nakaz Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy vid 19 lystopada 2018 r. № 1260.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-10>

УДК 004.4`4

Іваненко Антон Романович, аспірант,

<https://orcid.org/0000-0002-9846-537X>

Марченко Олександр Іванович, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-4537-3420>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

МЕТОД КОМПІЛЯЦІЇ ТИПІВ ОБ'ЄДНАННЯ МОВИ TYPESCRIPT У ПРОМІЖНУ МОВУ CIL ПЛАТФОРМИ .NET

Іваненко А.Р., Марченко О.І. Метод компіляції типів об'єднання мови TypeScript у проміжну мову CIL платформи .NET. У даній статті запропонований метод, який дозволяє ефективно компілювати змінні типу об'єднання у проміжну мову CIL платформи .NET. Розглянутий метод базується на ідеї зміни проміжного представлення програми шляхом перетворення оголошення змінної типу об'єднання у оголошення змінної узагальненого класу TSUnion, який зберігає інформацію про можливі типи змінної, а також її значення. Генерація CIL інструкцій відбувається вже для перетвореної програми враховуючи особливості введеного класу. Результатом роботи запропонованого способу є згенерований код, який показує швидкодню кращу за результат роботи компілятора мови F# у проміжну мову CIL.

Ключові слова: компілятор, проміжне представлення програми, тип об'єднання, CIL, CLR, .NET, TypeScript, JavaScript

Ivanenko A.R., Marchenko O.I. Method of compilation union types of TypeScript into Common Intermediate Language of .NET platform. This article proposes a method to efficiently compile union-type variables into the CIL intermediate language of the .NET platform. The considered method is based on the idea of changing the intermediate representation of the program by converting the declaration of the variable of the union type into the declaration of the variable of the generalized TSUnion class, which stores information about the possible types of the variable, as well as its value. The generation of CIL instructions takes place already for the converted program, taking into account the features of the introduced class. The result of the proposed method is the generated code, which shows a performance better than the result of the compiler of the F# language into the CIL intermediate language.

Keywords: compiler, intermediate representation of the program, union type, CIL, CLR, .NET, TypeScript, Javascript

Постановка наукової проблеми.

Мова програмування TypeScript дозволяє розробнику писати програми як в парадигмі об'єктно-орієнтовно програмування, так і у парадигмі функціонального. Однією з головних особливостей функціонального програмування є можливість оголошення змінних типу об'єднання. Цей тип змінних декларує, що значення відповідної змінної може мати один з перелічених типів. Завдяки цьому, наприклад, можливо реалізувати повернення значення з функції, яке може мати значення одного з декількох типів.

Програми написані на мові програмування TypeScript спочатку транслюються у мову JavaScript, яка відноситься до мов інтерпретуючого типу, тобто виконання написаних програм на цій мові відбувається інтерпретатором. Також варто зазначити, що у мові програмування JavaScript відсутня строга типізація, що значно полегшує трансляцію у цю мову програмування. На відміну від JavaScript, проміжна мову CIL віртуальної машини платформи .NET має строгу типізацію і чітко визначені правила роботи з різними типами, що значно ускладнює компіляцію мови TypeScript безпосередньо у проміжну мову CIL.

Таким чином, при розробці прямого компілятора мови програмування TypeScript у проміжну мову CIL віртуальної машини .NET постає задача розробити коректний та ефективний метод компіляції типів об'єднання у відповідні інструкції проміжної мови CIL.

Аналіз досліджень.

На сьогоднішній день існує досить незначна кількість статей, що описують способи трансляції різних мов програмування у проміжну мову CIL платформи .NET чи інші мови байт-кодового типу. Серед таких статей можна виділити опис методів трансляції байт-коду віртуальної машини Java [1] від корейських дослідників та трансляції мови програмування Scheme [2] від французьких вчених. Ці дослідження було розглянуто і проаналізовано у попередніх статтях [3,4,5], які присвячені компіляції

конкатенації рядкових виразів та замикання вкладених функцій. Відсутність великої кількості публікацій дає значний простір для проведення досліджень, які будуть мати як наукову новизну, так і практичну цінність.

Варто зазначити, що через відсутність аналогів компілятора мови TypeScript у проміжну мову CIL, які б підтримували трансляцію типів об'єднання, для порівняння отриманого результату було вирішено обрати компілятор функціональної мови F#, який підтримує схожу функціональність.

Метою даної статті є розробка методу компіляції типів об'єднання мови програмування TypeScript у проміжну мову CIL платформи .NET та порівняльний аналіз швидкодії згенерованого за розробленим способом коду з результатом роботи обраного аналога.

Термінологія.

Лексичний аналізатор – це частина транслятора, яка відповідає за перетворення вхідного тексту програми, яка представлена рядком символів, в рядок токенів (лексем), а також виконує перевірку на наявність лексичних помилок [6].

Синтаксичний аналізатор – це частина транслятора, що здійснює декомпозицію вхідної програми поданої у вигляді рядка токенів у структурні одиниці мови (оператори, описи, декларації, тощо) згідно заданої граматики і перевіряє на наявність синтаксичних помилок [6].

Семантичний аналізатор – це частина транслятора, що здійснює перевірку вхідної програми на наявність семантичних помилок, а також буде проміжне представлення програми.

Проміжне представлення програми – дерево розбору, яке не містить інформації про синтаксис та токени, а містить лише необхідну частину для виконання генерації коду.

Ловерінг – модифікація проміжного представлення програми з метою реалізації одних конструкцій мови програмування через використання інших.

Тип об'єднання – це тип, що описує значення, яке може бути одним із кількох типів. В мові Typescript використовується вертикальна риска (|), щоб розділити кожен тип. Наприклад number | string | boolean — це тип значення, яке може бути числом, рядком або логічним значенням [8].

Узагальнення (англ. generic) – засіб мов програмування, що дозволяє створювати програмний код, який містить єдине (типізоване) рішення задачі для різних типів, з його подальшим застосуванням для будь-якого конкретного типу (int, float, char тощо).

Нотація Бекуса-Наура (Форма Бекуса-Наура, БНФ) – це спосіб запису правил контекстно-вільної граматики, форма опису формальної мови.

Запропонований метод компіляції.

Через те, що початково мова програмування TypeScript була спроектована для трансляції у мову програмування JavaScript, яка не має строгої типізації, мова TypeScript має складну систему типів, яка дозволяє достатньо гнучко працювати з типізацією і покривати різні сценарії. До особливостей її системи типів можна віднести підтримку таких груп типів даних:

- узагальнені типи;
- типи об'єднання;
- типи перетину;

В даній статті розглянуто метод компіляції типів об'єднання, але зроблено це у спрощеному вигляді. Через те, що цільова мова програмування CIL платформи .NET має строгую систему типів і через те, що досить важко підтримувати усі функціональні можливості мови програмування TypeScript під час компіляції, було вирішено не підтримувати можливість виклику спільних функцій чи доступу до спільних полів обох типів. При роботі з типами об'єднання в запропонованій реалізації компілятора необхідно обов'язково привести тип об'єднання до конкретного типу за допомогою оператора instanceof, метод компіляції якого теж розглянуто у цій статті. Розглянемо метод компіляції на прикладі програми, яку зображено на рисунку 1.

```
const numberOrString: number | string = 10;  
if (numberOrString instanceof string)  
{  
    alert('This is string: ', numberOrString);  
}  
else  
{  
    alert('This is number: ', numberOrString);  
}
```

Рисунок 1 – Лістинг програми на мові TypeScript для якої виконується компіляція

Визначимо формальний опис змінних типу об'єднання мови TypeScript у формі БНФ, а також оператора instanceof та додамо підтримку цих правил до існуючого лексичного та синтаксичного аналізатора. БНФ оголошення змінної матиме такий вигляд (для простоти прикладу, вказана робота лише з примітивними типами мови TypeScript):

```
<variable-declarations-statement> --> <variable-declarations>  
<variable-declarations> --> <declaration-keyword> <declarations-list>  
<declarations-list> --> <declaration> | <declaration>, <declarations-list>  
<declaration> --> <identifier> <type-annotation>  
<type-annotation> --> :<type-clause>  
<type-clause> --> <attribute> | <union-type>  
<union-type> --> <type-clause><union-delimiter><type-clause>  
<attribute> --> boolean | number | string  
<declaration-keyword> --> var | let | const  
<union-delimiter> --> |
```

БНФ підтримки оператора instanceof:

```
<expression> --> <instanceof-expression>  
<instanceof-expression> --> <literal-expression> instanceof <type-expression>  
<literal-expression> --> <literal>  
<type-expression> --> <attribute>
```

Після проведення лексичного і синтаксичного аналізу вхідна програма на мові TypeScript буде перетворена у проміжну форму у вигляді дерева розбору. На етапі семантичного аналізу необхідно проаналізувати усі блоки коду (тобто тіла функцій, циклів та умовних конструкцій) та перевірити, що для будь-якої змінної типу об'єднання ми звертаємось до її методів та полів лише попередньо перевіривши її на ознаку, що вона має значення певного типу. Для виконання таких дій на етапі семантичного аналізу та ловерінгу пропонується наступний метод:

1. Якщо змінна в даному контексті має декілька можливих типів, то під час доступу до її полів, вивести оголошення про помилку.

2. Якщо наявна умовна конструкція if з перевіркою на тип змінної (instanceof), то в тілі умовної конструкції оголосимо додаткову змінну, яка буде мати тип на який виконувалась перевірка і присвоюємо їй значення поточної змінної, попередньо виконавши операцію приведення типу до відповідного їй типу. Всі операції з поточною змінною в межах блоку переписуємо, використовуючи нововведену змінну.

3. Якщо при виконанні пункту 2, умовна конструкція if має блок else, то у випадку, коли змінна має лише два можливих типи, потрібно виконати ті ж самі дії, як у пункті 2, але для протилежного типу. Якщо ж змінна має більше, ніж 2 типи, то виключити тип, що був перевірений для контексту змінної у області видимості цього блоку.

4. Якщо виконується перевірка на тип, який не є одним з можливих типів, що змінна може мати, то виконуємо видалення усього блоку коду, оскільки він є недосяжним при виконанні програми.

Таким чином після виконання семантичного аналізу та лверінгу отримуємо фінальне представлення програми, яке можна транслювати у проміжну мову CIL платформи .NET. Приклад перетворення проміжного представлення програми за запропонованим способом зображено на рисунку

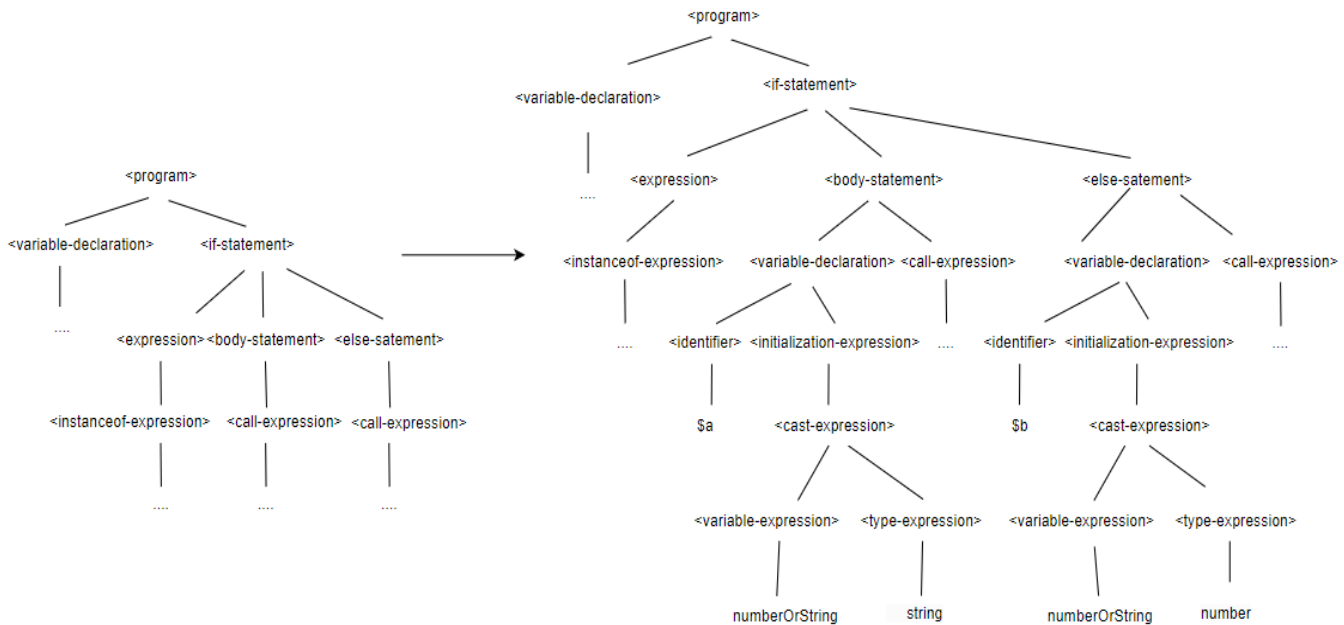


Рисунок 2 – Приклад перетворення дерева розбору за описаним способом введення додаткових змінних з певним типом

На останньому етапі необхідно визначити, у який тип віртуальної машини CLR платформи .NET необхідно транслювати оголошення змінної, результат функції, поля класу, тощо, які мають тип об'єднання. Звісно можемо виконати трансляцію у тип System.Object який є базовим для всіх типів і виконувати усі перевірки суто на рівні компілятора, який розроблюємо, але головним недоліком такого підходу є втрата інформації про можливі типи змінної на рівні збірки і при підключенні такої збірки до проєктів, які написані на інших мовах програмування, що підтримують трансляцію у мову CIL (приклад C# чи Visual Basic), але не підтримують роботу з типами об'єднання, буде втрачена строга типізація.

Для того, щоб усунути цей недолік, в рамках запропонованого методу трансляції пропонується ввести додатковий узагальнений тип TSUnion, який приймає у вигляді аргументу можливі типи змінної.

```
public readonly struct TSUnion<T0, T1>
{
    readonly T0 _value0;
    readonly T1 _value1;
    readonly int _index;
    TSUnion(int index, T0 value0 = default, T1 value1 = default)
    {
        _index = index;
        _value0 = value0;
        _value1 = value1;
    }
    public object Value =>
        _index switch
        {
            0 => _value0,
            1 => _value1,
            _ => throw new InvalidOperationException()
        };
    public int Index => _index;
    public bool IsT0 => _index == 0;
    public bool IsT1 => _index == 1;

    public T0 AsT0 =>
        _index == 0 ?
```



```
        _value0 :
        throw new InvalidOperationException($"Cannot return as T0 as result is T_{index}");
public T1 AsT1 =>
    _index == 1 ?
        _value1 :
        throw new InvalidOperationException($"Cannot return as T1 as result is T_{index}");

public static implicit operator TSUnion<T0, T1>(T0 t) => new TSUnion<T0, T1>(0, value0: t);
public static implicit operator TSUnion<T0, T1>(T1 t) => new TSUnion<T0, T1>(1, value1: t);

bool Equals(TSUnion<T0, T1> other) =>
    _index == other._index &&
    _index switch
    {
        0 => Equals(_value0, other._value0),
        1 => Equals(_value1, other._value1),
        _ => false
    };
public override bool Equals(object obj)
{
    if (ReferenceEquals(null, obj))
    {
        return false;
    }
    return obj is TSUnion<T0, T1> o && Equals(o);
}
public override string ToString() =>
    _index switch
    {
        0 => _value0.ToString(),
        1 => _value1.ToString(),
        _ => throw new InvalidOperationException("Unexpected index.");
    };
public override int GetHashCode()
{
    unchecked
    {
        int hashCode = _index switch
        {
            {
                0 => _value0?.GetHashCode(),
                1 => _value1?.GetHashCode(),
                _ => 0
            } ?? 0;
        return (hashCode * 397) ^ _index;
    }
}
}
```

Рисунок 3 – Лістинг класу TSUnion на мові програмування C# для типу об'єднання, що може мати 2 можливих типи

До переваг даного методу можна віднести:

- наявність у збірці (що є результатом виконання компіляції програми) інформації про усі можливі типи для типу об'єднання;
- змінні типу об'єднання матимуть додаткові методи для роботи з ними, що полегшує написання програм.

До недоліків даного підходу можемо віднести те, що у платформі .NET існує обмеження на максимальну кількість аргументів, які можуть бути передані в узагальнений тип. Виходячи з цього, визначимо тип TSUnion для випадків, коли тип об'єднання має від 2 до 9 можливих типів. Для наочності на рисунку 3 зображено лістинг узагальненого класу на мові програмування C# для типів об'єднання двох типів.

Кожний клас має окреме поле для зберігання значення певного типу, а також деякі методи, що полегшують роботу з цим типом даних. Перевизначені оператори приведення типу для типів, які змінна може мати, полегшують роботу з приведення типів примітивів до типів об'єднання. Перевизначені методи порівняння (Equals), хешування (GetHashCode) та перетворення у рядок (ToString) покращують роботу з базовими бібліотеками платформи .NET. Методи IsT та AsT полегшують перевірку і приведення до певного типу. Саме ці методи є ключовими при компіляції оператора instanceof. Ці методи пронумеровані певним числом від 0 до 9, яке відповідає порядковому номеру типу серед

аргументів узагальненого класу.

Виконаємо компіляцію цих класів у збірку TS.Infrastructure.dll та додамо підтримку підключення цієї збірки до результуючої програми, що дозволить використовувати тип TSUnion при генерації IL інструкцій компілятором, що розроблюється.

Наступні дії запропонованого методу полягають у виконанні компіляції проміжного представлення програми, яка містить типи об'єднання, за такими правилами:

1. Оголошення змінної, поля класу чи результату функції, що мають тип об'єднання, транслюємо у тип TSUnion з відповідною кількістю аргументів.
2. Оператор instanceof для змінних типів об'єднання транслюємо у перевірку на певний тип, використовуючи відповідний метод IsT, до типу, на який виконується перевірка типу.
3. Компіляція приведення до необхідного типу виконується використовуючи відповідний необхідному типу метод AsT класу TSUnion.

Результат компіляції тестової програми (рисунок 1) за запропонованим методом у IL-інструкції зображено на рисунку 4.

```
.entrypoint
.maxstack 2
.locals init (
  [0] valuetype T.TSUnion`2<int32, string> numberOrString,
  [1] string a1,
  [2] int32 b1
)
IL_0000: ldc.i4.s      10 // 0x0a
IL_0002: call          valuetype TS.Infrastructure.TSUnion`2<!0/*int32*/, !1/*string*/> valuetype
ConsoleApp3.TSUnion`2<int32, string>::op_Implicit(!0/*int32*/)
IL_0007: stloc.0       // numberOrString
IL_0008: ldloc.s     numberOrString
IL_000a: call       instance bool valuetype TS.Infrastructure.TSUnion`2<int32, string>::get_IsT1()
IL_000f: brfalse.s  IL_0025
// [ 7 5 - 7 34]
IL_0011: ldloc.s     numberOrString
IL_0013: call       instance !1/*string*/ valuetype TS.Infrastructure.TSUnion`2<int32,
string>::get_AsT1()
IL_0018: stloc.1     // a1
IL_0019: ldstr      "This is string: "
IL_001e: ldloc.1  // a1
IL_001f: call     void [System.Console]System.Console::WriteLine(string, object)
IL_0024: ret
IL_0025: ldloc.s     numberOrString
IL_0027: call       instance !0/*int32*/ valuetype TS.Infrastructure.TSUnion`2<int32,
string>::get_AsT0()
IL_002c: stloc.2   // b1
IL_002d: ldstr      "This is number: "
IL_0032: ldloc.2   // b1
IL_0033: box       [System.Runtime]System.Int32
IL_0038: call     void [System.Console]System.Console::WriteLine(string, object)
IL_003d: ret
} // end of method Program::'<Main>$'
```

Рисунок 4 – Лістинг на мові CIL скомпільованої тестової програми за запропонованим способом

Аналіз отриманих результатів.

Через відсутність аналогів компілятора мови TypeScript у проміжну мову CIL, які б підтримували трансляцію типів об'єднання, в якості аналога для аналізу результатів дослідження було вирішено обрати компілятор функціональної мови програмування F#, який підтримує схожу функціональність. Таким чином для тестування були написані 2 аналогічні програми на мовах програмування TypeScript та F#, що зображені на рисунку 5.

```
for (let i = 0; i < 1000000; i++)  
{  
  const numberOrString: number | string = i % 2 ? 'test'  
  const result = numberOrString instanceof number  
    ? numberOrString + i  
    : numberOrString.length + i  
}
```

```
type NumberOrString =  
  | Number of int  
  | String of string  
for i in 0..1000000 do  
  let numberOrString = if i % 2 = 0  
    then Number i  
    else String "test"  
  let result = match numberOrString with  
  | Number num -> num + i  
  | String str -> str.Length + i  
  |> ignore
```

Рисунок 5 – Лістинг програм на мовах TypeScript (зліва) та F# (справа), що тестувались

s

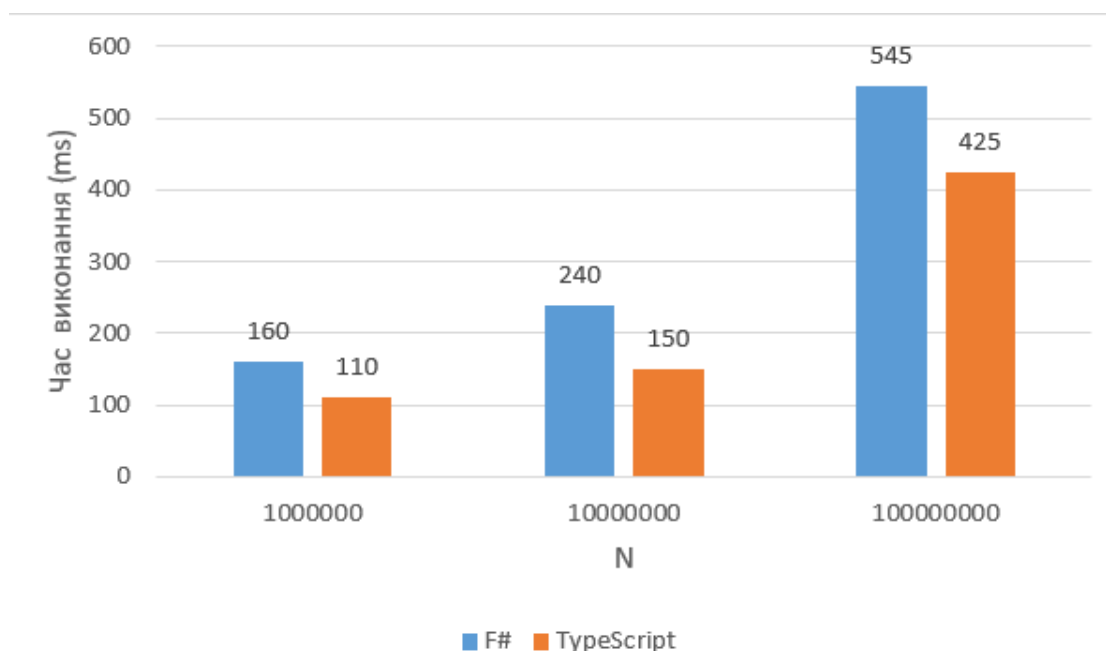


Рисунок 6 – Графік порівняння швидкодії згенерованих інструкцій для типів об'єднання компілятором F# та компілятором TypeScript за запропонованим способом.

Висновки.

При продовженні дослідження методів компіляції мови TypeScript у проміжну мову CIL платформи .NET було розроблено метод компіляції типів об'єднання шляхом введення спеціального узагальненого класу TSUnion, який зберігає інформацію про усі можливі типи, а також має спеціальні методи, що спрощують роботу з ним як під час трансляції, так і під час роботи зі скомпільованою бібліотекою на мові TypeScript при використанні її у програмах, написаних на інших мовах програмування платформи .NET.

В результаті реалізації у тестовому компіляторі описаного у цій статті способу, був отриманий результат, аналіз якого продемонстрував кращу у 1.3 – 1.6 разів швидкодію згенерованого коду розробленим тестовим компілятором, ніж код, згенерований компілятором-аналогом, в якості якого був взятий компілятор мови F#. Цей компілятор було обрано аналогом через відсутність інших компіляторів

мови TypeScript у мову CIL, що мають схожі функціональні можливості.

Отже, враховуючи отримані результати, а також результати минулих досліджень [3,4,5], можна ще раз підтвердити доцільність створення прямого компілятора мови програмування TypeScript у проміжний код CIL платформи .NET, а описане дослідження має як наукову новизну, так і практичну цінність.

Список бібліографічного опису

1. YangSun Lee, SeungWon Na, DaeHoon Hwang, Language Translator for Execution Java programs in .NET [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200411922370411.pdf>
2. Yannis Bres, Bernard Serpette, Manuel Serrano, Compiling Scheme programs to .NET Common Intermediate Language [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/213885643_Compiling_Scheme_programs_to_NET_Common_Intermediate_Language.
3. Іваненко А.Р., Марченко О.І Спосіб трансляції конкатенації рядкових виразів мови TypeScript у проміжну мову CIL [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://cit-journal.com.ua/index.php/cit/article/view/352/451>
4. Іваненко А.Р., Марченко О.І Спосіб компіляції замикання вкладених функцій мови TypeScript у проміжну мову CIL платформи .NET [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://cit-journal.com.ua/index.php/cit/article/view/233/322>
5. Марченко О.І., Іваненко А.Р. Аналіз способів трансляції мови TypeScript у проміжну мову CIL платформи .NET платформи .NET.
6. Марченко О.І. Основи проектування трансляторів: Конспект лекцій, Київ 2021 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45710>
7. Рихтер Дж. CLR via C#. Программирование на платформе Microsoft .NET Framework 4.5 на языке C#. 4-е изд., СПб.:Питер, 2013
8. Документація TypeScript [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.typescriptlang.org/docs/handbook/unions-and-intersections.html>.
9. Документація Mono.Cecil [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://cecil.pe/>

References

1. YangSun Lee, SeungWon Na, DaeHoon Hwang, Language Translator for Execution Java programs in .NET [Electronic resource] – Access mode: <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200411922370411.pdf>
2. Yannis Bres, Bernard Serpette, Manuel Serrano, Compiling Scheme programs to .NET Common Intermediate Language [Electronic resource] – Access mode: https://www.researchgate.net/publication/213885643_Compiling_Scheme_programs_to_NET_Common_Intermediate_Language.
3. Ivanenko A.R., Marchenko O.I Translation the concatenation of TypeScript string expressions into Common Intermediate Language of .NET platform. [Electronic resource] – Access mode: <http://cit-journal.com.ua/index.php/cit/article/view/233/322>
4. Ivanenko A.R., Marchenko O.I Compilation the closure of TypeScript nested function into Common Intermediate Language of .NET platform [Electronic resource] – Access mode: <https://cit-journal.com.ua/index.php/cit/article/view/352/451>
5. Marchenko O.I., Ivanenko A.R. Analysis of TypeScript translation methods into Common Intermediate Language of .NET platform
6. Marchenko O.I. Fundamentals of translator design., Kyiv 2021 [Electronic resource] – Access mode: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45710>.
7. Jeffrey Richter. CLR via C#. 2012
8. TypeScript documentation [Electronic resource] – Режим доступу: <https://www.typescriptlang.org/docs/handbook/unions-and-intersections.html>
9. Mono.Cecil documentation [Electronic resource] – Access mode: <https://cecil.pe/>

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-11>

УДК 004.94:656.02

Павленко Андрій Васильович, магістр

Костючко Сергій Миколайович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-1262-6268>

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ВИЯВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ НАЙВРАЗЛИВІШИХ МІСЦЬ ВЕБ-РЕСУРСІВ

Павленко А.В., Костючко С.М. Виявлення та аналіз найвразливіших місць веб-ресурсів. У даній статті виконаний опис найпопулярніших вразливостей веб-ресурсів, вказанні місця на які націлені атаки зловмисників, також пропонується засоби для виявлення та аналізу вразливостей, а саме OpenVAS та ElasticSearch. OpenVAS вибрано, тому що він має ряд істотних переваг, серед існуючих засобів для виявлення вразливостей. Виконано встановлення та показано технологію роботи даних систем.

Ключові слова: вразливість, веб-ресурс, виявлення та моніторинг, загроза, OpenVAS та ElasticSearch.

Pavlenko A.V., Kostiuchko S.M. Detection and analysis of the most vulnerable places of web resources. This article provides a description of the most popular vulnerabilities of web resources, indicates the places targeted by attackers' attacks, and also offers tools for detecting and analyzing vulnerabilities, namely OpenVAS and ElasticSearch. OpenVAS was chosen because it has a number of significant advantages among the existing tools for detecting vulnerabilities. The installation was performed and the technology of these systems was shown.

Keywords: vulnerability, web resource, detection and monitoring, threat, OpenVAS and ElasticSearch.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями. Веб-ресурси є ключовими елементами в сучасному світі, оскільки багато інформації та послуг доступно через Інтернет. Однак, ці ресурси можуть піддаватися атакам, які використовують вразливості в їхній структурі або програмному забезпеченні [2]. Тому потрібно бути обізнаним про ці загрози, оскільки це сприяє розробці ефективних методів захисту.

Збільшення кількості загроз інформаційній безпеці сприяє впровадженню на підприємствах систем, які здатні виявити та усунути дану проблему. Проблеми необхідно виявити та усунути в найшвидший термін задля усунення загроз, виникнення додаткових капіталовкладень та витоку даних.

Не менш важливим питанням є управління ризиками. Управління ризиками в інформаційних технологіях виявляється ключовою проблемою в сучасному світі, оскільки зростають інциденти безпеки та фінансові збитки, пов'язані з ними.

Це все стосується до сучасних проблем кібербезпеки, оскільки потрібно максимально швидко виявити вразливість, використовуючи при цьому різні методи, а саме алгебраїчні та з використанням нейронних мереж. Завдяки цьому у нас буде можливість зосередитися на ще двох основних проблемах, таких як виявлення вторгнень в реальному часі та виявлення вразливостей у програмних та апаратних системах при цьому проводячи оцінку їх стійкості до вторгнень [5].

Аналіз останніх досліджень, у яких започатковано вирішення проблеми. Важливо встановити та проаналізувати найчастіші місця, на які зловмисники спрямовують свої атаки на веб-сайти. Це можуть бути, наприклад, слабкі паролі, незахищені точки введення даних, незахищені API або розкриті конфіденційні дані [3].

Останні дослідження спрямовані на розробку нових підходів до управління ризиками, які базуються на принципах когнітивних технологій та поведінкових наук. Це може включати в себе застосування штучного інтелекту, машинного навчання, аналізу даних та інших сучасних методів для виявлення, аналізу і мінімізації ризиків в інформаційних технологіях.

Одним з важливих завдань є оцінка ризиків з максимальною точністю, щоб надати пріоритет високотяжким ризикам перед низькотяжкими. Це дозволяє ефективніше спрямовувати ресурси на управління найбільш значущими ризиками [4].

Аналіз атак на системи обробки державних інформаційних ресурсів: Потрібно досліджувати різні типи атак, які можуть бути спрямовані на державні інформаційні ресурси. Проводити аналіз сучасних баз даних, що містять детальний опис вразливостей та атак, а також класифікацію атак та їх параметри. Описувати стратегії здійснення атак та основні фази та особливості проведення атак. Розробку методів виявлення атак та визначення вразливостей: Також потрібно розробити методи виявлення атак та визначення вразливостей державних інформаційних ресурсів, що обробляються засобами інформаційно-телекомунікаційних систем. Вимоги до цих методів враховують вимоги до

методів виявлення атак, параметрів даних та характеристичних особливостей сучасних систем виявлення атак [6].

Опис вразливостей веб-ресурсів

Існує велика кількість вразливостей, кожна з яких має свої характеристики. Вразливість — це слабе місце (недолік) у системі, яким може скористатись зловмисник.

Owasp надає список таких найпопулярніших вразливостей :

Порушення контролю доступу – ця вразливість дозволяє отримати доступ до облікового запису адміністратора [11].

Незахищеність критичних даних – виникає при неналежному зберіганні конфіденційної інформації, такої як номери кредитних карт, медичні дані, паспортні дані, дані майнової приналежності та інші особисті дані. Ці дані є цінними та чутливими і мають велику вартість для власників, а також можуть бути використані зловмисниками для шахрайства, крадіжки особистої інформації, ідентифікаційних злочинів та інших негативних цілей. Незахищеність критичних даних може мати серйозні наслідки для постраждалих осіб, таких як фінансові втрати, втрата репутації, порушення приватності, недостовірність медичних записів, можливість крадіжки особистості та інші негативні наслідки. Крім того, це може також мати вплив на організації та установи, які відповідають за збереження цих даних, шляхом порушення довіри клієнтів та втрати репутації [12].

Внутрішні об'єкти XML. Ця вразливість може бути використана зловмисниками для здійснення атак, таких як атаки на витік даних або впровадження шкідливого коду. Зловмисник може використовувати введення XML, що містить посилання на зовнішні об'єкти, як спосіб отримання несанкціонованого доступу до ресурсів системи або виконання коду, що може завдати шкоди системі. Для вирішення цієї проблеми необхідно використовувати безпечні методи обробки XML. Це може включати належне налаштування аналізаторів XML для обмеження доступу до зовнішніх об'єктів, використання механізмів аутентифікації та авторизації для контролю доступу до ресурсів, а також проведення перевірки та валідації введеного XML для виявлення та блокування потенційно шкідливих або небезпечних елементів [12].

Неправильна конфігурація безпеки – це проблема виявляється тоді, коли система чи програмне забезпечення поставлені в експлуатацію зі стандартними налаштуваннями, які не враховують специфіку середовища чи потенційні загрози, вони стають легким мішенню для зловмисників. Налаштування по замовчуванню часто не забезпечують достатнього рівня безпеки, оскільки вони призначені для загального використання та зручності. Зловмисники знають про це та використовують цю слабкість для здійснення атак. Наприклад, стандартні паролі, відкриті порти, недостатня перевірка автентичності, відсутність захисту від введення даних та інші подібні проблеми можуть виникати через неправильну конфігурацію безпеки. Для попередження цієї проблеми необхідно враховувати специфіку системи та середовища, встановлювати налаштування безпеки, які відповідають найкращим практикам та стандартам безпеки, а також проводити аудит та перевірку системи на предмет виявлення можливих проблем і вразливостей [12].

Використання компонентів з відомими вразливостями – виникає зазвичай, у випадку використання різних не перевірених компонентів в свій код. Компоненти з відомими вразливостями - це програмні бібліотеки, модулі або фреймворки, які мають відомі проблеми безпеки, такі як уразливості у коді, недоліки в реалізації або неправильну обробку даних. Ці вразливості можуть бути відомі публічно, оскільки багато компонентів з відкритим вихідним кодом пройшли процес аудиту безпеки та їх вразливості документовані. Зловмисники використовують ці вразливості для здійснення атак на систему, отримання несанкціонованого доступу до даних, виконання віддаленого коду або впровадження шкідливого програмного забезпечення. Однак, важливо зауважити, що використання компонентів з відкритим вихідним кодом само по собі не є проблемою. Багато з цих компонентів мають активну спільноту розробників, яка виправляє виявлені вразливості та випускає оновлення. Проблема виникає, коли веб-розробники не враховують ці вразливості та не оновлюють використовувані компоненти до останньої безпечної версії [13].

Збої в автентифікації та ідентифікації – це вразливість, що входить до розряду проблем з ідентифікацією, автентифікацією. Виникає зазвичай коли система не здійснює належну перевірку облікових даних, це може дозволити зловмисникам використати неправильні облікові дані для доступу до системи. А також коли механізми автентифікації не налаштовані належним чином, це може відкрити можливості для зламу або обходу механізмів автентифікації.

- Збій криптографії – це вразливість, використовується зловмисниками, коли криптографія налаштована з наявністю помилок або взагалі її відсутності та дозволяє їм отримати доступ до важливих даних в системі. Також часто виникає при помилковому використанні криптографічних протоколів, тобто коли вони не використовуються належним чином, це може створити можливості для атаки на криптографію і отримання несанкціонованого доступу до захищених даних.

- Помилки цілісності програмного забезпечення і даних – це вразливість, що зосереджується на проблемах пов'язаних з оновленнями програмного забезпечення, важливими даними та конвеєрами CI/CD (постійна інтеграція/постійна доставка). Виникає під час оновлення програмного забезпечення, а саме коли виконується неправильне оновлення програмного забезпечення, що може призвести до некоректної роботи системи, порушити цілісність даних або відкрити можливості для атак [9].

- Збій в журналі та моніторингу безпеки – це вразливість, що відноситься до проблеми, коли система, відповідальна за збір, реєстрацію та аналіз подій безпеки, не працює належним чином або взагалі перестає функціонувати. Це може статися через різні причини, такі як помилкова конфігурація, технічні проблеми, відмова обладнання або програмного забезпечення. Деякі стандарти безпеки вимагають ведення журналів подій та моніторингу безпеки з метою дотримання вимог відповідності та проведення аудиту. Якщо система моніторингу не працює належним чином, це може призвести до порушення вимог стандартів безпеки та небажаних наслідків у сфері регуляторного відповідності [10].

- Кросс-сайт скриптинг (Cross-Site Scripting, XSS) є типом вразливості, який дозволяє зловмисникам впроваджувати та виконувати зловмисний скрипт на веб-сторінках, які переглядають користувачі. Ця вразливість виникає, коли вхідні дані, які не були належним чином перевірені або екрановані, вставляються безпосередньо на веб-сторінку і виконуються в браузері користувача [7,8].

Найбільш вразливі місця веб-ресурсів

До найбільш вразливих та найбажаніших місць веб-ресурсів до яких зловмисники намагаються отримати доступ, належать дані (інформація) – адже, більшість атак, що проводяться мають за мету отримання конфіденційних даних [1].

Найчастіше причиною появи вразливостей та взломів є написаний програмістами код додатку. Написання безпечного коду вимагає уважності, досвіду та дотримання низки кращих практик безпеки програмування. Деякі з найпоширеніших причин вразливостей, пов'язаних з кодом програмного забезпечення, включають:

Недостатня перевірка введення: Недостатня або неправильна перевірка введення даних може призвести до вразливостей, таких як XSS або SQL-ін'єкції. Програмісти повинні бути обережними та правильно перевіряти, очищувати та валідувати вхідні дані, щоб запобігти вразливостям.

Недостатня аутентифікація та авторизація: Слабкі механізми аутентифікації (перевірка ідентифікації користувача) та авторизації (контроль доступу до ресурсів) можуть дозволити зловмисникам отримати несанкціонований доступ до системи або функцій, які їм не належать. Програмісти повинні ретельно розробляти і реалізовувати механізми аутентифікації та авторизації.

Вразливості у криптографії – застосовується при неправильному використанні алгоритмів шифрування та інших криптографічних функцій може призвести до вразливостей. Наприклад, використання слабких алгоритмів шифрування, недостатня довжина ключів або неналежне зберігання криптографічних матеріалів можуть зробити систему вразливою.

Недостатня обробка винятків та помилок – виникає при неправильній обробці винятків та помилок, що згодом може розкрити конфіденційну інформацію або призвести до вразливостей. Програмісти повинні належним чином обробляти помилки та винятки, щоб уникнути витoku інформації та забезпечити стабільність системи [14].

Найчастіше атаки провадяться на:

- незашифровані паролі – зловмисник може отримати доступ до вашого облікового запису, якщо сайт неналежно виконує шифрування паролів. Також потрібно звертати увагу на паролі їхню довжину, використання спеціальних символів;

- адміністративний доступ - зловмисники можуть намагатися отримати доступ до адміністративних функцій веб-сайту, таких як панель адміністратора або база даних, для виконання шкідливих дій на веб-сайті або для отримання доступу до конфіденційної інформації;

недостатня обробка введення – це вразливість, яка дозволяє зловмисникам вводити шкідливий код на веб-сайті. Наприклад, зловмисники можуть використовувати вразливості, щоб вбудувати JavaScript-код у веб-сторінки або виконувати інші шкідливі дії;

зловмисники можуть намагатися отримати доступ до сесій користувачів для виконання шкідливих дій на їх ім'я або для викрадення конфіденційної інформації. Не захищені сесії можуть бути скомпрометовані, що дозволяє зловмисникам отримувати доступ до конфіденційної інформації.

можливість завантажувати користувачам файли – веб-сайт дозволяє користувачам завантажувати файли, це може стати вразливістю. Зловмисники можуть завантажувати шкідливі файли, які можуть виконуватися на сервері, що призводить до порушення безпеки веб-сайту. Крім того, якщо файли не захищені належним чином, зловмисники можуть мати доступ до них, що дозволяє їм отримати конфіденційну інформацію, яка міститься в цих файлах;

зловмисники можуть намагатися перехопити дані, що передаються між користувачем та веб-сайтом, такі як логіни, паролі та інші конфіденційні дані. Це може бути здійснено через незахищені з'єднання, такі як HTTP, або за допомогою шкідливих додатків, вірусів або шкідливих програм, які встановлюються на комп'ютери користувачів.

недостатній контроль доступу – це вразливість, яка дозволяє зловмисникам отримувати доступ до чутливої інформації або функцій, до яких вони не мають повинен бути доступ. Це може статися, якщо веб-сайт не використовує належні методи автентифікації та авторизації користувачів.

відкриті директорії системних файлів – атаки використовуються для отримання даних, які зловмисник може здійснення атаки та для одержання доступу до облікових даних сайту. Також відкриті системні файли можуть використовуватися для одержання доступу для цих виконання цих файлів, що можуть взаємодіяти з файловою системою чи базами даних;

Бази даних є дуже важливою складовою веб-сайту. Зловмисники можуть використовувати різні методи атак на базу даних, такі як SQL-ін'єкції, для отримання доступу до конфіденційної інформації, внесення змін у дані, або видалення даних з бази.

Куки – це файли, які зберігаються на комп'ютері користувача та містять інформацію про відвідування веб-сайту. Якщо веб-сайт не захищений належним чином, зловмисники можуть отримати доступ до цієї інформації. За допомогою куків зловмисники можуть отримати доступ до облікових записів користувачів, а також використовувати цю інформацію для атак на інші веб-сайти, які використовують ті ж самі куки. Файли cookie можуть містити конфіденційну інформацію про користувачів, таку як імена користувачів та паролі. Зловмисники можуть використовувати вразливості в реалізації cookie, щоб отримати доступ до цієї інформації.

недостатній захист від переповнення буферу пам'яті – це вразливість, яка дозволяє зловмисникам переповнити буфер, що може призвести до виконання шкідливого коду. Наприклад, зловмисники можуть використовувати цю вразливість, щоб запустити вірус або шкідливу програму на сервері;

програмне забезпечення – може використовуватися зловмисниками у випадку використання ПЗ з не офіційних та неперевічених джерел;

Отримання доступу до журналу подій відбувається для того щоб отримати можливість приховати можливу атаку. Недостатній моніторинг та керування журналами зазвичай призводить до не можливості відстеження моделей поведінки користувачів, що дозволяє зловмисникам скомпрометувати систему.;

SSL сертифікат – наявність даного сертифікату свідчить про безпеку сайту. Тому зловмисники можуть спробувати підробити його, або намагатися отримати доступ до сайту без даного сертифікату;

Форми введення даних – це такі компоненти як форми для входу в систему або форми для заповнення замовлень, часто стають мішенню атак XSS або SQL-ін'єкцій. Зловмисники можуть вставляти шкідливий код в поля введення даних, щоб отримати доступ до захищених даних або виконати шкідливі дії на веб-сайті [15].

Elastic Stack

· ElasticSearch – це один із компонентів, які входять до стеку ELK (складові частини стеку показано на рис.1). ELK Stack – це система, яка складається із таких компонентів: ElasticSearch, Logstash, Kibana, Beats. ElasticSearch є фактично ядром цієї системи, він здійснює поєднання в собі кількох функцій:

- бази даних;

- аналітичної;
- пошукової системи.

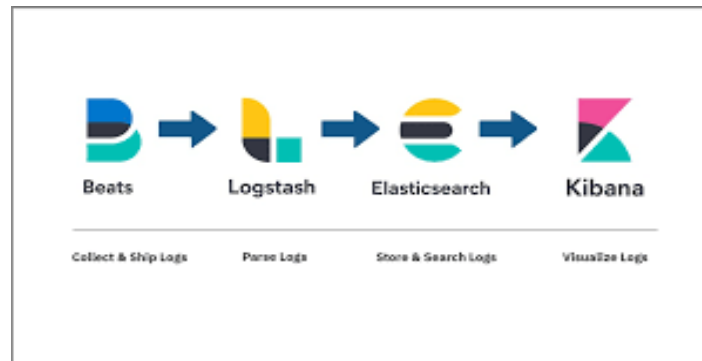


Рисунок 1 – Складові частини ELK Stack

ElasticSearch – це спеціалізоване програмне забезпечення для повнотекстового пошуку. Перевагами даного програмного рішення є легке масштабування і реплікація. Зазвичай використовується в високонавантажених проектах в великими обсягами даних з чим він відмінно справляється. Є не реляційним сховищем (NoSQL) документів в форматі JSON. Вона використовує технологію Lucene. Для роботи та нормального функціонування застосовується Java Virtual Machine, що означає що для роботи потрібно багато ресурсів процесора та оперативної пам'яті. Всі повідомлення, які надходять індексуються як "документ", так само, як і реляційних баз даних. Для роботи з базою даних система використовує JSON запити з допомогою REST API. Це застосовується для видачі індексованих документів та статистика у формі запит – відповідь. Для візуалізації цих даних використовується Kibana.

Logstash – це важлива складова стеку ELK на стороні сервера. Основним застосуванням, якого є здійснення обробки даних. Він здійснює автоматичний збір та обробку даних з кількох джерел одночасно, після цього він надсилає дані в Elasticsearch. Здійснює обробку логів подій із різних джерел. За допомогою цієї утиліти можна виділяти поля та їх значення, можна здійснювати виконання налаштування фільтрації та редагування даних. Налаштування можна виконати через конфігураційні файли. Типова конфігурація складається з кількох вхідних потоків інформації (input) – тут ми вказуємо на, який порт будуть відправлятися дані, містить фільтри для читання цієї інформації (filter), а вихідних даних (output). Приклад конфігураційного файлу показано на рисунку 2.

```
input {
  tcp {
    type => "habr"
    port => "11111"
  }
}
filter {
  mutate {
    type => "habr"
    add_field => [ "habra_field", "Hello Habr" ]
  }
}
output {
  stdout {
    type => "habr"
    message => "%{habra_field}: #{@message}"
  }
}
```

Рисунок 2 – Конфігураційний файл Logstash

Kibana використовується для візуального відображення звітів користувачами у вигляді діаграм. Ще одна із функцій цього елемента є можливість здійснювати через нього адміністрування бази даних. Зазвичай використовується для аналізу журналів та моніторинг додатків та запущених

процесів. Даний інструмент дозволяє легко створювати графіки, кругові діаграми, гістограми та використовується в цілому як інструмент візуалізації Elasticsearch. На рисунку 3 показано звіт в Kibana.

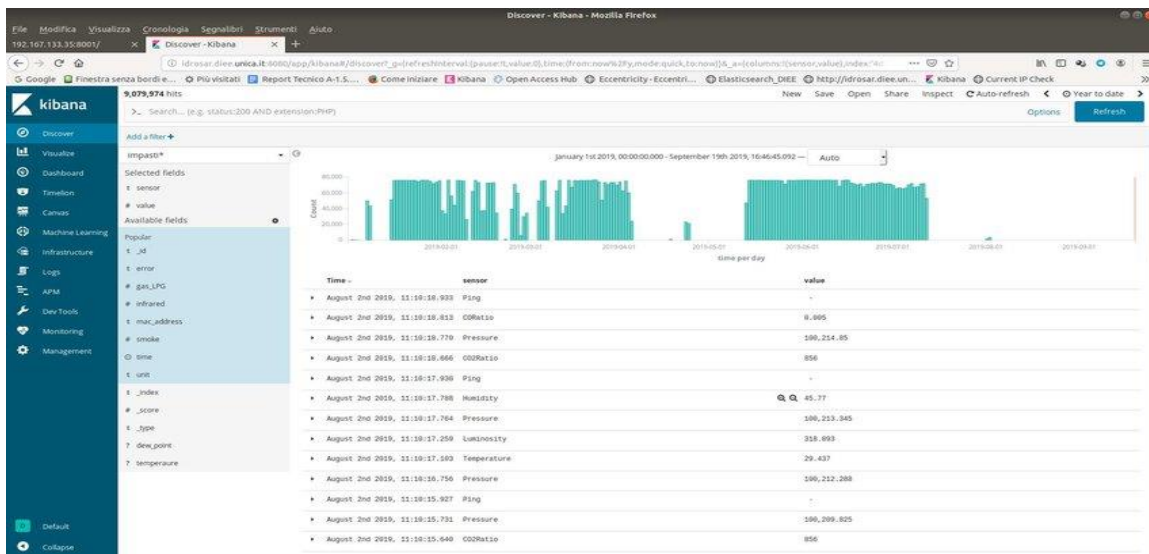


Рисунок 3 – Створений звіт Kibana

Beats – програмне забезпечення з вільним програмним кодом застосовується, як платформа для доставки даних, встановлюється на стороні клієнта. Для роботи використовує бібліотеку libnet, що застосовується для збору даних та налаштування введення, а також надає API для того, щоб мати змогу передати дані від джерела. Встановлюється Beats на пристрої, які розміщуються на некластерних вузлах. Звіт з графіком та діаграмою показаний на рисунку 4 [16].

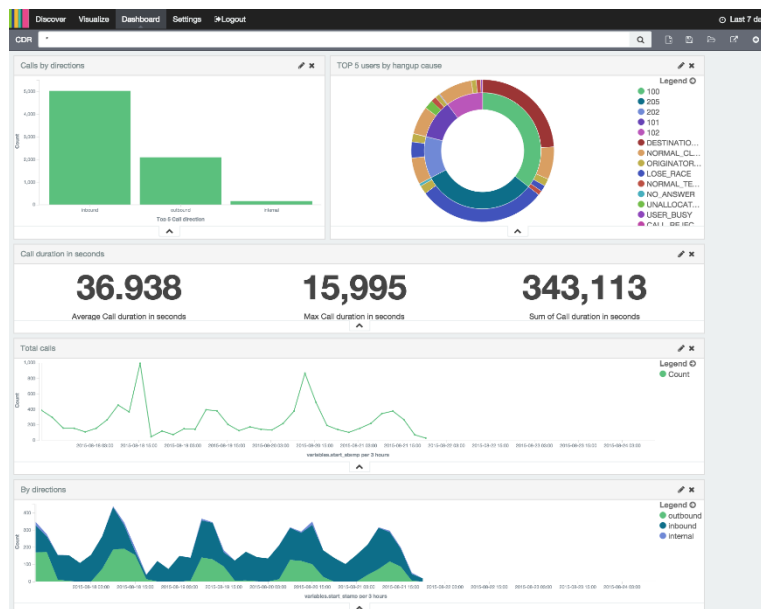


Рисунок 4 – Звіт з графіком та діаграмою

Сканер OpenVAS

OpenVAS – це програма, що складається з декількох сервісів та утиліт, основним завданням, якого є проведення сканування вузлів мережі, веб-сайтів на наявність вразливостей та управління ними.

Сканер проводить пошук IP-адреси, після цього завдяки відкритим портам відбувається пошук незахищених портів та служб. Сканер під час проведення сканування здатний виявити неправильні конфігурації, та 'дірки' в системі безпеки в цілому.

Сканер містить колекцію NVT тестів безпеки приблизна кількість, яких 30000. Для перевірки наявності вразливостей використовуються бази автоматизованого управління CVE та OpenSCAP завдяки цим ресурсам можна переглянути опис проблеми.

OpenVAS побудований за допомогою клієнт-серверної схеми складається він з декількох утиліт та сервісів, кожен з яких має свої функції. Серверна частина встановлюється тільки на Linux-подібні системи. Клієнтська частина може бути встановлена на будь-яку ОС.

Ядро системи встановлюється на порту 9391 ним виступає OpenVAS Scanner. Даний сервіс виконує сканування на предмет наявності вразливостей та неправильних конфігурацій. Для виконання сканування сервіс використовує ресурси: nmap, rpscan, ike-scan та інші [17].

OpenVAS Manager ще одна важлива складова частина. Вона відповідає за збір та аналіз даних після сканування, розміщується на порту 9390. Він використовується для того, щоб здійснити контроль над вразливостями та для виявлення хибних спрацювань, в даному сервісі можна налаштувати сканування за розкладом. Для здійснення управління сканером використовується протокол OTP (OpenVAS Transfer Protocol). Налаштування та інформація, яку зібрано зберігається в базі даних SQLite [18].

OpenVAS Administrator – сервіс, який відповідає за керування обліковими записами та по суті управління всіма керівними функціями системи. Розміщується він на порту 9393.

Консоль управління Greenbone Security Assistant показана на рисунку 5.

Інтерфейс в даного сканера зрозумілий, хоча досить складний в встановленні та налаштуванні. Меню сканера складається з семи пунктів, воно розташовується з самого верху. Поле 'Quick start: Immediately scan an IP address' дозволяє почати сканування вузла або ресурсу одразу не задаючи додаткових параметрів, потрібно буде ввести тільки IP- адресу або ім'я ресурсу.

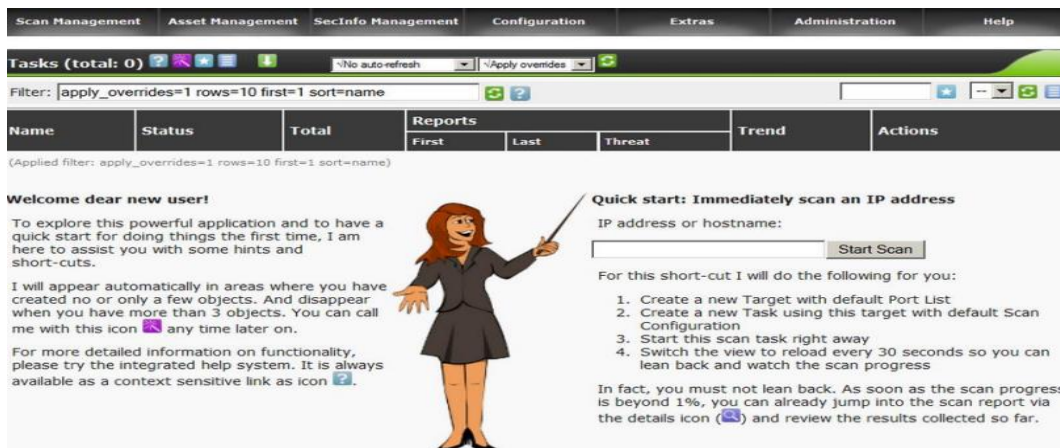


Рисунок 5 –Консоль управління Greenbone Security Assistant

Для вибору детального сканування потрібно створити нову задачу, де потрібно буде вказати параметри сканування. Створення нової задачі показано на рисунку 6.

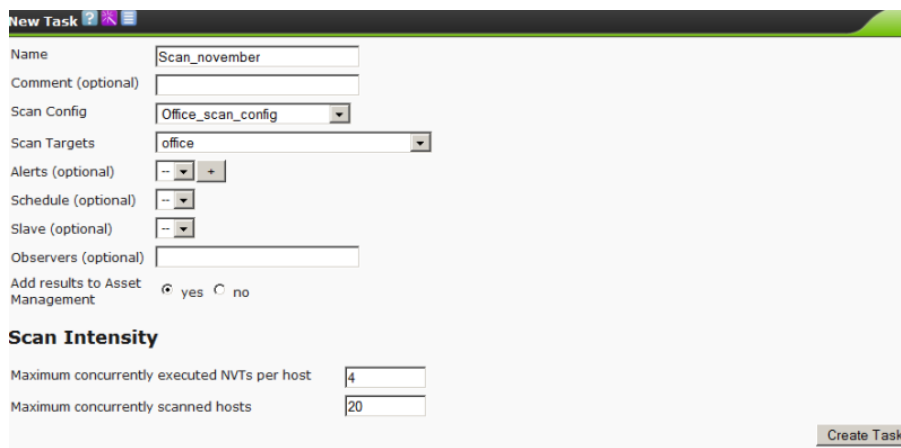


Рисунок 6 – Створення нової задачі

Після цього можна почати процес сканування, зазвичай він дуже тривалий (процес сканування на показаний на рисунку 7).

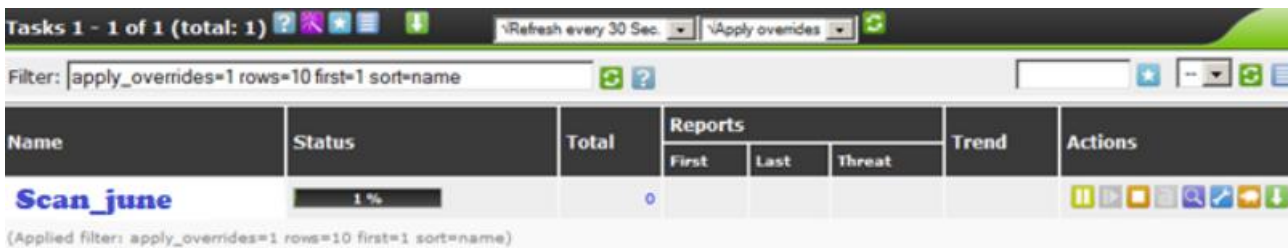


Рисунок 7 –Процес сканування

Після завершення сканування можна натиснути на лупу для детального опису проблеми. На рисунку 8 показані всі знайдені проблеми.

	High	Medium	Low	Log	False Pos.	Total	Run Alert	Download
Full report:	43	174	837	8058	0	9112		
All filtered results:	43	174	0	0	0	217		
Filtered results 1 - 100:	29	71	0	0	0	100		

Рисунок 8 –Таблиця зі знайденими проблемами

Висновки

В даній роботі проведено опис найпоширеніших вразливостей веб-ресурсів та виконана ідентифікація місць, на які зловмисники найчастіше спрямовують свої атаки. Аналізуючи ці вразливості та місця атак, стає очевидним, що безпека веб-ресурсів є критично важливою і повинна бути врахована при розробці та підтримці веб-додатків.

Встановлення та застосування сканеру OpenVAS та Elastic search демонструє, яким чином можна використовувати сучасні інструменти для виявлення вразливостей та аналізу безпеки веб-ресурсів. Ці інструменти надають зручність та ефективність при виявленні проблем безпеки та допомагають забезпечити високий рівень захисту веб-додатків.

Результати тестування та демонстрація використання цих засобів підтверджують їхню ефективність та важливість для виявлення вразливостей. При використанні правильно налаштованих інструментів, таких як OpenVAS та Elastic search, можна забезпечити більш повну інформацію про вразливості та прийняти необхідні заходи для запобігання атакам та зловживанням.

Список бібліографічного опису

1. Gaolong W., Yongzhen L. Design and implementation of a web application vulnerability detection system. 2022 *International Symposium on Advances in Informatics, Electronics and Education (ISAIEE)*, Frankfurt, Germany, 17–19 December 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/isaiee57420.2022.00089> (date of access: 05.06.2023).
2. Source Code Vulnerability Detection Using Vulnerability Dependency Representation Graph / H. Yang et al. 2022 *IEEE International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom)*, Wuhan, China, 9–11 December 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/trustcom56396.2022.00070> (date of access: 04.06.2023).
3. Deep Analysis of Attacks and Vulnerabilities of Web Security / N. Chillur et al. *Futuristic Trends in Networks and Computing Technologies*. Singapore, 2022. P. 1087–1097. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-19-5037-7_78 (date of access: 04.06.2023).
4. Kaur G., Lashkari A. H. Information Technology Risk Management. *Advances in Cybersecurity Management*. Cham, 2021. P. 269–287. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-71381-2_13 (date of access: 04.06.2023).
5. Летичевський О.О. Сучасні наукові проблеми кібербезпеки. *Вісник НАН України*. 2023. № 2. С. 12—20. <https://doi.org/10.15407/vsn2023.02.012> (дата звернення: 04.06.2023)
6. Сальник С. В., Сторчак А. С., Крамський А. С. Аналіз вразливостей та атак на державні інформаційні ресурси, що обробляються в інформаційно-телекомунікаційних системах. *Системи обробки інформації*. 2019. № 2(157). С. 121–128. URL: <https://doi.org/10.30748/soi.2019.157.17> (дата звернення: 04.06.2023).
7. OWASP Top Ten | OWASP Foundation. *OWASP Foundation, the Open Source Foundation for Application Security* | OWASP Foundation. URL: <https://owasp.org/www-project-top-ten/> (date of access: 08.06.2023).

8. Cross Site Scripting (XSS) | OWASP Foundation. *OWASP Foundation, the Open Source Foundation for Application Security* | OWASP Foundation. URL: <https://owasp.org/www-community/attacks/xss/> (date of access: 08.06.2023).
9. ПОМИЛКИ В ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ. *Stud.* URL: https://stud.com.ua/128164/informatika/pomilki_programnomu_zabezpechenni (дата звернення: 08.06.2023).
10. A09 Security Logging and Monitoring Failures - OWASP Top 10:2021. *OWASP Foundation, the Open Source Foundation for Application Security* | OWASP Foundation. URL: https://owasp.org/Top10/A09_2021-Security_Logging_and_Monitoring_Failures/ (date of access: 08.06.2023).
11. Чому контроль доступу важливий – приклади та рішення для контролю доступу. *Hideez.* URL: <https://hideez.com/uk-ua/blogs/news/access-control> (дата звернення: 08.06.2023).
12. Що таке OWASP Top-10?. *UKEY Web application firewall.* URL: <https://ukeywaf.com/baza/shho-take-owasp-top-10/> (дата звернення: 08.06.2023).
13. Putting the Sec in DevSecOps: Simplify Application Security | GuardRails. *GuardRails.* URL: <https://www.guardrails.io/blog/using-components-with-known-vulnerabilities-a-guide-to-secure-software-development/> (date of access: 08.06.2023).
14. S. Disawal and U. Suman, "An Analysis and Classification of Vulnerabilities in Web-Based Application Development," 2021 8th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), New Delhi, India, 2021, pp. 782-785.
15. Як захистити сайт від злому | 10 способів захисту веб-сайту *Fondy. Онлайн платежі для вашого бізнесу.* URL:<https://fondy.ua/uk/blog/how-to-protect-website/> (дата звернення: 09.06.2023).
16. What is Elasticsearch?. *Elastic.* URL:<https://www.elastic.co/what-is/elasticsearch> (date of access: 12.06.2023).
17. Nessus vs OpenVAS: Which is Better? A Head-to-Head Comparison. *Comparitech.* URL: <https://www.comparitech.com/net-admin/nessus-vs-openvas/> (date of access: 14.06.2023).
18. OpenVas: framework per l'analisi di vulnerabilità. *HTML.it.* URL:<https://www.html.it/pag/71804/openvas-framework-per-lanalisi-di-vulnerabilita/> (date of access: 14.06.2023).
19. V. Satsyk, O. Mekush, N. Lishchyna, N. Khrystynets, L. Gumeniuk and L. Korobchuk, "Soil Analysis Software Tool for Smart Control of Agronomic Data," 2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ruzomberok, Slovakia, 2022, pp. 364-368, doi: 10.1109/ACIT54803.2022.9913133.
20. P. Savaryn, V. Strekhya, M. Brych, L. Brych, V. Kabak and M. Polishchuk, "The Original Method of Controlling a Computer Using Distance Sensors," 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 683-688, doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9767011.

References

1. Cross Site Scripting (XSS) | OWASP Foundation. *OWASP Foundation, the Open Source Foundation for Application Security* | OWASP Foundation. URL: <https://owasp.org/www-community/attacks/xss/> (date of access: 08.06.2023).
2. Putting the Sec in DevSecOps: Simplify Application Security | GuardRails. *GuardRails.* URL: <https://www.guardrails.io/blog/using-components-with-known-vulnerabilities-a-guide-to-secure-software-development/> (date of access: 08.06.2023).
3. S. Disawal and U. Suman, "An Analysis and Classification of Vulnerabilities in Web-Based Application Development," 2021 8th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), New Delhi, India, 2021, pp. 782-785.
4. What is Elasticsearch?. *Elastic.* URL:<https://www.elastic.co/what-is/elasticsearch> (date of access: 12.06.2023).
5. Nessus vs OpenVAS: Which is Better? A Head-to-Head Comparison. *Comparitech.* URL: <https://www.comparitech.com/net-admin/nessus-vs-openvas/> (date of access: 14.06.2023).
6. OpenVas: framework per l'analisi di vulnerabilità. *HTML.it.* URL:<https://www.html.it/pag/71804/openvas-framework-per-lanalisi-di-vulnerabilita/> (date of access: 14.06.2023).
7. V. Satsyk, O. Mekush, N. Lishchyna, N. Khrystynets, L. Gumeniuk and L. Korobchuk, "Soil Analysis Software Tool for Smart Control of Agronomic Data," 2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Ruzomberok, Slovakia, 2022, pp. 364-368, doi: 10.1109/ACIT54803.2022.9913133.
8. P. Savaryn, V. Strekhya, M. Brych, L. Brych, V. Kabak and M. Polishchuk, "The Original Method of Controlling a Computer Using Distance Sensors," 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 683-688, doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9767011.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-12>

УДК 004.056.53

Поліщук Микола Миколайович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-1218-5925>

Семенюк Олександр Вікторович, магістр

Поліщук Лілія Олексіївна, магістр

<https://orcid.org/0000-0001-9282-1639>

Ломакін Микола Валентинович, магістр

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

МОЖЛИВОСТІ АВТОРИЗАЦІЇ ТА ЗАХИСТУ ДАНИХ КОРИСТУВАЧА ПІД ЧАС РОЗРОБКИ ХМАРНИХ ВЕБ-ДОДАТКІВ ДЛЯ ІОТ

Поліщук М.М., Семенюк О. В., Поліщук Л.О., Ломакін М.В. **Можливості авторизації та захисту даних користувача під час розробки хмарних веб-додатків для ІоТ.** У статті розглядаються проблеми безпеки та захисту інформації, які створює поширення Інтернету речей. Досліджуються різні підходи та технології для запровадження надійних та безпечних протоколів авторизації пристроїв та збереження конфіденційних даних користувачів. На основі розглянутих технологій і протоколів було спроектовано і розроблено архітектуру системи для керування розумним ІоТ пристроєм.

Ключові слова: авторизація, автентифікація, безпека даних, інтернет речей, мобільні додатки.

Polishchuk M.M., Semenyuk O.V., Polishchuk L.O., Lomakin M.V. **Possibilities of authorization and protection of user data during the development of cloud web applications for IoT.** The article examines the security and information protection problems created by the spread of the Internet of Things. Various approaches and technologies are being explored for implementing reliable and secure device authorization protocols and preserving confidential user data. Based on the considered technologies and protocols, the system architecture for controlling a smart IoT device was designed and developed.

Key words: authorization, authentication, data security, Internet of Things, mobile applications.

Вступ. Інтернет речей (ІоТ) – революційна технологія, що об'єднує різні пристрої і системи, від побутових до промислових, у безперерйну мережу. Ця екосистема принесла безпрецедентну зручність, ефективність та автоматизацію. Однак ІоТ має проблему з безпекою - потрібні надійні заходи для захисту конфіденційних даних користувачів. Зростання пристроїв ІоТ призвело до багатьох вразливостей, які потребують уваги, таких як несанкціонований доступ, витік даних і порушення конфіденційності. Щоб забезпечити стале зростання та успішне впровадження ІоТ, необхідно ефективно вирішити ці проблеми з безпекою.

Постановка наукової проблеми. Інтернет речей приніс значний прогрес, але він також представляє різні проблеми безпеки. Слабка автентифікація, ненадійне шифрування та відсутність оновлень безпеки роблять пристрої ІоТ сприйнятливими до несанкціонованого доступу та витоку даних. Фізичний доступ до пристроїв викликає занепокоєння щодо втручання, а атаки на відмову в обслуговуванні можуть порушити основні служби [1]. Проблеми сумісності, обізнаності користувачів, і маніпулювання даними ще більше ускладнюють проблему. Вразливість ланцюга постачання оновлень та веб-атаки додають ризиків. Вирішення цих проблем вимагає від виробників впровадження надійних заходів безпеки, від користувачів — пильності в управлінні пристроями, а також промислової співпраці щодо стандартів безпеки та найкращих практик.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Автентифікація – процес розпізнавання користувачів для отримання доступу до пристроїв, систем, мереж, серверів, веб-сайтів або програм. Мета автентифікації полягає у підтвердженні ідентичності користувача. Наприклад, користувач А не може переглядати особисті дані користувача В, що підтверджується процесом автентифікації. Це підвищує безпеку, оскільки неавторизовані особи не мають доступу до конфіденційних даних. Основний метод автентифікації - комбінація імені користувача та пароля [2, 3].

Існує кілька методів, за допомогою яких ми можемо досягти надійної автентифікації для захисту зв'язку пристроїв ІоТ:

- Одностороння автентифікація – одна сторона автентифікується перед іншою, але остання не вимагає автентифікації.
- Двостороння автентифікація – обидві сторони автентифікуються одна перед одною.
- Трестороння автентифікація – центральний орган автентифікує обидві сторони та допомагає їм автентифікувати одна одну.

- Розподілена автентифікація – використовує метод розподіленої прямої автентифікації між сторонами зв'язку.
- Централізована автентифікація – використовує централізований сервер або довірену третю сторону для керування сертифікатами автентифікації.

Протокол X.509 - найбезпечніший метод цифрової автентифікації, який базується на моделі ланцюжка довіри сертифікатів. Використання сертифікатів X.509 полегшує масштабування виробництва та спрощує доставку обладнання. Інфраструктура відкритих ключів (PKI) містить деревоподібну структуру серверів і пристроїв, підтримуючи список довірених кореневих сертифікатів [4].

Кожен сертифікат містить відкритий ключ пристрою, підписаний закритим ключем ЦС з унікальним "відбитком" для чіткої ідентифікації за допомогою алгоритму, такого як RSA.

Авторизація — це процес надання дозволу на доступ до певного ресурсу. Дозволи в цьому контексті визначають дії, які користувач може виконувати над ресурсом [2].

У деяких випадках авторизація пов'язана з ідентифікацією, наприклад, як під час посадки в літак, пасажиру потрібні посадковий талон і паспорт для підтвердження особи та дозволу на політ.

Комп'ютерні системи використовують авторизацію так само, як і реальні приклади, описані вище. IAM (Ідентифікація та керування доступом) — це IT-дисципліна, яка включає авторизацію та автентифікацію для контролю того, хто має доступ до системних ресурсів і встановлення привілеїв клієнта [4]. Правила авторизації у комп'ютерних системах дозволяють об'єктам виконувати завдання, які не дозволені іншим об'єктам, подібно до процесу контролю доступу в реальному світі.

Існує кілька методів авторизації, які можуть бути використані в контексті Інтернету речей [4]:

- API ключі – до запиту додається ключ (токен), який перевіряється на сервері на валідність. Вразливий, якщо ключ потрапить до сторонніх осіб.
- Базова авторизація – використовує імена користувачів і паролі, як простий підхід. Дані перевіряються з авторизованим списком на сервері.
- HMAC – використовує секретний ключ для підпису запитів і захисту від несанкціонованого втручання. Краще поєднувати з HTTPS для захисту від атак типу "людина посередині".
- OAuth – складний метод авторизації, що дозволяє стороннім програмам отримувати доступ до обмежених ресурсів. Надає токени доступу стороннім програмам, які потім використовуються для авторизації запитів від імені користувача.

Для обробки великої кількості даних, створених пристроями, у сфері Інтернету речей використовуються різні бази даних. Деякі з них доволі вузького призначення, пристосовані спеціально для використання в хмарі або адаптовані для роботи з конкретними структурами даних [5].

Найпопулярнішими рішеннями для невеликих систем і домашніх мереж є NoSQL бази даних, оскільки зазвичай вони не вимагають детального налаштування, підтримують гнучку модель даних, яка легко адаптується до змін, та мають низьку криву навчання, що буде важливо для початківців. Особливо це стосується хмарних рішень, таких як Firestore та MongoDB Atlas, оскільки вони пропонують вже готову інфраструктуру, яка вимагає мінімальних налаштувань для початку роботи [6].

На основі проведених досліджень та аналізу їх результатів, наведених вище, було спроектовано та розроблено архітектуру проекту, який демонструє можливі шляхи реалізації авторизації та керування даними у контексті Інтернету речей.

Проект являє собою просту систему керування IoT пристроями, зокрема, розумним кондиціонером, який має доступ до локальної домашньої мережі через технологію WiFi.

Для збереження та керування даними було прийнято рішення використовувати базу даних Google Firestore для збереження метрик, а також списку доданих пристроїв.

Для реалізації реєстрації та автентифікації було обрано платформу Firebase. Вона проста у використанні та має добре задокументоване SDK. Авторизації запитів від користувачів виконується за допомогою протоколу JSON Web Token (JWT).

Проект передбачає наявність мобільного додатка, через який і буде здійснюватись взаємодія із серверною частиною та IoT пристроєм. Для розробки цього додатка було обрано фреймворк Flutter.

Для імітації роботи IoT пристрою було створено окреме програмне забезпечення – набір скриптів написаних на TypeScript, які виконують певні запити та відповідають на запити ззовні, керують внутрішнім станом тощо. Структура папок цього сервісу зображена на рисунку 1.

Папка data містить файли конфігурації та файли, які зберігають значення внутрішнього стану пристрою. Папка keys містить файли, які потрібні для авторизації запитів – публічні ключі, сертифікати, серійний номер пристрою. Виконання сервісу починається у файлі main.ts, який викликає функції із файли у папці src, в яких і міститься основна логіка.

У файлі settings_server.ts описано логіку зміни налаштувань пристрою. Код у цьому файлі налаштовує сервер TCP у Node.js за допомогою модуля net для обробки запитів клієнтів і керування подіями, пов'язаними з пристроєм. Сервер взаємодіє з двома класами, StateManager і DataClient, відповідальними за керування станом пристрою та логуванням метрик відповідно.

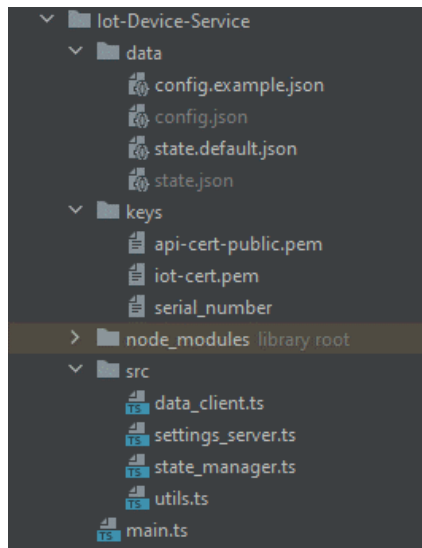


Рисунок 1 – Структура папок сервісу IoT пристрою

Список доступних подій наведено у переліку Action:

```
enum Action {
    PW_ON,
    PW_OFF,
    SELF_CLEAN_ON,
    SELF_CLEAN_OFF,
    SET_WORK_MODE,
    TURBO_ON,
    TURBO_OFF,
    WIFI_ON,
    WIFI_OFF,
    DISP_LED_ON,
    DISP_LED_OFF,
    GET_TEMP,
    GET_NOISE,
    GET_PW_CON,
    METRICS_LOGGING_ON,
    METRICS_LOGGING_OFF,
    CURRENT_SETTINGS,
}
```

Сервер прослуховує подію "connection", яка виникає, коли клієнт підключається. Після підключення сервер обробляє дві події:

- Подія "data": коли дані отримані від клієнта, сервер визначає тип запиту (requestData.type) і виконує різні дії залежно від типу сигналу. Для кожної дії сервер викликає різні методи з класів stateManager і dataClient. Після обробки запиту відповіді надсилаються назад клієнту шляхом запису даних у сокет за допомогою writeToSocket(), а потім сокет закривається за допомогою socket.end().

- Подія "close": Ця подія спрацьовує, коли з'єднання клієнта закрито. Сервер виводить у консоль повідомлення про це.

Функція `writeToSocket(socket, data)` використовується для запису даних у вигляді рядка JSON у вказаний сокет, обробляючи можливі помилки під час запису:

```
function writeToSocket(socket: Socket, data: any) {
  socket.write(JSON.stringify({ data })); (err) => {
    if (err) {
      console.error(
        `ERROR: Error occurred while writing to socket
${socket.remoteAddress}:${socket.remotePort}`);
    };
    console.error(err);
  }
};
```

Код у файлі `state_manager.ts` оголошує клас під назвою `StateManager`, який відповідає за керування станом гіпотетичного пристрою. Стан можна зберегти у файлі JSON. Це виконано за допомогою пакету `lowdb/node`, який дозволяє створити невелику локальну базу даних у JSON файлі та робити різні запити до неї.

Клас містить методи для зміни налаштувань і таймер для реєстрації показників. Приклад методів зміни стану наведено нижче:

```
async wifiOn() {
  this.db.data.wifi = true;
  await this.db.write();
}

async wifiOff() {
  this.db.data.wifi = false;
  await this.db.write();
}
```

Виміри поточних метрик проводяться за допомогою генерації випадкового числа:

```
private startMetricsLogging() {
  this.metricsInterval = setInterval(async () => {
    this.db.data.temperature_c = this.measureTemperature();
    this.db.data.noise = this.measureNoiseLevel();
    this.db.data.pw_consumption = this.measurePwConsumption();

    await this.db.write();
  }, METRICS_POLLING_INTERVAL);
}

private measureTemperature() {
  return randomFloat(24, 27);
}

private measureNoiseLevel() {
  return randomFloat(50, 55);
}

private measurePwConsumption() {
  return randomFloat(0.81, 0.83);
}
```

У файлі `data_client.ts` оголошено клас `DataClient` для інкапсуляції функціональності логування метрик. У класі наявні методи `loggingOn()` та `loggingOff()`, які, відповідно, вмикають та вимикають надсилання метрик до зовнішнього API.

Метод `loggingOn()` перевіряє наявність посилання на зовнішнє API у файлі конфігурації і виводить помилку, якщо його немає. Після цього метод завантажує вміст файла із серійним номером пристрою у приватне поле класу `serialNumber`. Це серійний номер потім відправляється у заголовку

X-Serial-Number і служить додатковим кроком під час авторизації пристрою. Після цього викликається метод `loggingOff()`, у випадку якщо логування вже було запущено раніше, і встановлюється новий інтервал для логування у поле `loggingInterval`. Під час логування, метод отримує потрібні метрики із екземпляру класу `StateManager`, робить запит для перевірки сертифікату і надсилає метрики на задану в конфігурації адресу.

Перевірка сертифікату реалізована так:

```
private async verifyCertificate() {
  if (!this.apiPublicKey) this.apiPublicKey = await getApiPublicKey();
  if (!this.iotCert) this.iotCert = await getIotCert();

  const formData = new FormData();

  formData.append(
    "public_key",
    new Blob([this.apiPublicKey]),
    API_PUBLIC_KEY_FILENAME,
  );
  formData.append("iot_cert", new Blob([this.iotCert]), IOT_CERT_FILENAME);

  await axios.post(config.endpoints.log_metrics, formData, {
    headers: {
      "X-Verify-Certs-Request": true,
    },
  });
}
```

Запит для логування поточних метрик виглядає наступним чином:

```
const temperature_c = await this.stateManager.getTemperature();
const noise = await this.stateManager.getNoiseLevel();
const pw_consumption = await this.stateManager.getPwConsumption();

try {
  await this.verifyCertificate();
  await axios.post(
    config.endpoints.log_metrics,
    {
      temperature_c,
      noise,
      pw_consumption,
    },
    { headers: { "X-Serial-Number": this.serialNumber } },
  );
  console.log(
    `LOG: Written metrics data to database: ${JSON.stringify({
      temperature_c,
      noise,
      pw_consumption,
    })}`
  );
} catch (e) {
  console.error(
    `ERROR: Could not log metrics: ${
      e.response?.data?.error || e.message
    }`
  );
}
```

Сервіс API написано на мові програмування TypeScript та з використанням бібліотеки `express`. Структура папок зображена на рисунку 2. Основний файл, з якого починається виконання програми розташований в корені проекту і називається `api.ts`. В ньому створюється екземпляр самого додатка, підключаються проміжні програми (`middleware`), шляхи до кінцевих точок (`endpoints`) та запускається HTTP сервер.

У вихідному коді програми містяться також сертифікати для авторизації запитів до IoT девайса та файл конфігурації для Firebase SDK.

У папці services знаходяться класи для взаємодії із зовнішніми джерелами даних. Наприклад SettingsService – для взаємодії із сервером налаштувань IoT пристрою. DevicesService – для керування пристроями в базі даних Firestore. CertificatesService – завантаження та верифікація сертифікатів.

Окремо зупинимось на проміжних програмах для авторизації та верифікації запитів від пристрою – authMiddleware, verifyCertificateMiddleware та verifyDeviceMiddleware.

Програма authMiddleware перевіряє наявність та валідність JWT токена у запитах до API від мобільного додатка. Запит проходить далі тільки якщо токен наявний і валідний.

Програма verifyCertificateMiddleware перевіряє валідність сертифікатів пристрою і API під час запиту. Файл публічного ключа API та сертифікат пристрою приходить і тілі запиту. Файл сертифікату API та публічного ключа пристрою міститься в папці certs в корені API сервісу.

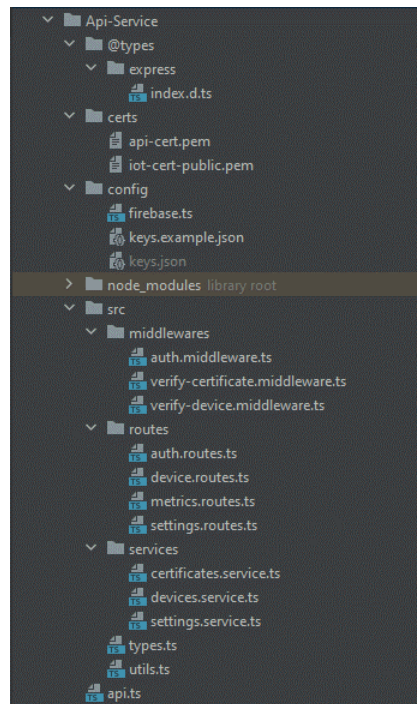


Рисунок 2 – Структура папок API сервісу

Програма authMiddleware:

```
export async function authMiddleware(
  req: Request,
  res: Response,
  next: NextFunction,
) {
  const accessToken = (req.headers.authorization as string)?.split(" ")?.[1];
  req.user = null;

  if (!accessToken)
    return res
      .status(401)
      .json({ error: "Access token is invalid or expired" });

  try {
    req.user = await firebaseAdmin.auth().verifyIdToken(accessToken);
    next();
  } catch (e) {
    console.log(e);
    return res
      .status(401)
      .json({ error: "Access token is invalid or expired" });
  }
}
```

Програма verifyCertificateMiddleware:

```
export async function verifyCertificateMiddleware(
  req: Request,
  res: Response,
  next: NextFunction,
) {
  const files = (
    req.headers["x-verify-certs-request"] === "true" ? req.files || null : null
  ) as FilesObject | null;
  if (!files) return next();

  const pk_api = files.public_key[0];
  const iotCert = files.iot_cert[0];
  if (!pk_api)
    return res.status(401).json({ error: "API: Public key not found" });

  if (!iotCert)
    return res.status(401).json({ error: "IoT: Certificate not found" });

  const pk_iot = await certService.getIotPublicKey();

  if (!pk_iot)
    return res.status(401).json({ error: "IoT: Public key not found" });

  const apiCert = await certService.getApiCertificate();
  if (!apiCert)
    return res.status(401).json({ error: "API: Certificate not found" });

  try {
    const x509_api = new X509Certificate(apiCert);
    const pkObj_api = createPublicKey(pk_api.buffer);

    const x509_iot = new X509Certificate(iotCert.buffer);
    const pkObj_iot = createPublicKey(pk_iot);

    const valid = x509_api.verify(pkObj_api) && x509_iot.verify(pkObj_iot);

    if (!valid)
      return res
        .status(401)
        .json({ error: "Certificate or public key is not valid" });

    return res.status(200).end();
  } catch (e) {
    return res
      .status(401)
      .json({ error: "Certificate or public key is not valid" });
  }
}
```

Програма verifyDeviceMiddleware авторизує запит від IoT пристрою до API. Вона перевіряє наявність заголовка X-Serial-Number, який містить серійний номер пристрою, у запиті, а також наявність цього серійного номера в базі даних:

```
export async function verifyDeviceMiddleware(
  req: Request,
  res: Response,
  next: NextFunction,
) {
  const serialNumber = req.headers["x-serial-number"] as string;

  if (!serialNumber) {
    return res.status(403).json({ error: "No serial number provided" });
  }

  try {
    const devices = await devicesService.getBySerialNumber(serialNumber);
```

```
const exists = !!devices.length;

if (!exists) {
  return res.status(403).json({ error: "Unknown device" });
}

next();
} catch (e) {
  console.log(e);
  return res
    .status(500)
    .json({ error: "Error while processing the request" });
}
}
```

Додаток для керування налаштуванням IoT пристрою розроблено на фреймворку Flutter. Основна одиниця для побудови інтерфейсів у цьому фреймворку називається «віджет» (Widget). Виконання починається із файла main.dart, розташованого в корені проекту.

Після запуску додатка відкривається головний екран (рис. 3), на якому міститься нижня панель навігації для переходу на інші віджети. Панель навігації містить посилання такі віджети: «Метрики», «Додати пристрій», «Налаштування». Крім цього, при запуску додаток перевіряє наявність збереженого в локальному сховищі JWT токена. Якщо його немає, користувача автоматично переадресовує на екран автентифікації в додаток (рис. 4). З цього екрану можна також перейти на екран реєстрації користувача (рис. 5). Така ж переадресація відбудеться, якщо токен наявний, але сервер не зміг підтвердити його валідність і надіслав відповідну помилку.



Рисунок 3 – Головний екран додатка

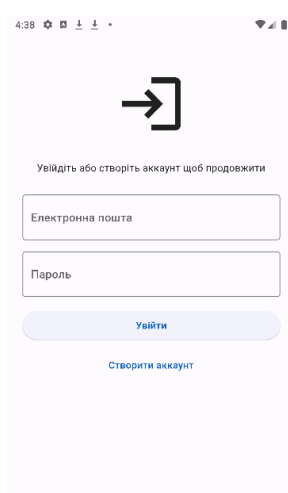


Рисунок 4 – Екран автентифікації

Віджет «Метрики» містить у собі картку з інформацією про температуру та інформацію про рівень шуму і споживання електроенергії. Щоб отримати актуальну інформацію можна натиснути на відповідну кнопку на картці. Крім цього, інформація оновлюється автоматично кожну хвилину.

Екран «Додати пристрій» (рис. 6) містить форму, через яку користувач може додати новий пристрій у свій акаунт, щоб потім періодично отримувати з нього метрики і зберігати їх у базу даних.

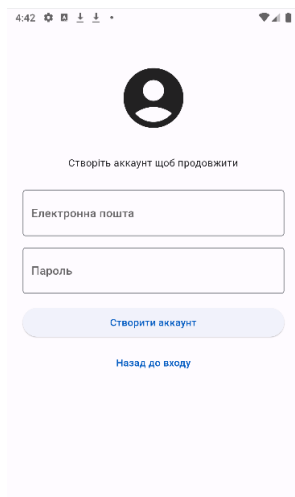


Рисунок 5 – Екран реєстрації

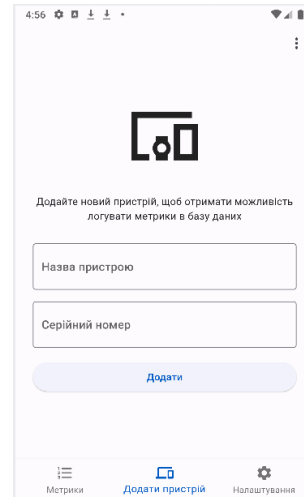


Рисунок 6 – Екран додавання пристрою

Екран «Налаштування» містить список налаштувань IoT пристрою, які можна змінити (рис. 7). Після переходу на цей екран, додаток робить запит до API, щоб отримати список налаштувань і їх поточні значення. При зміні налаштувань через інтерфейс додаток відсилає запит до API з відповідним сигналом. На цьому ж екрані користувач може вимкнути живлення пристрою та керувати станом логування метрик в базу даних.

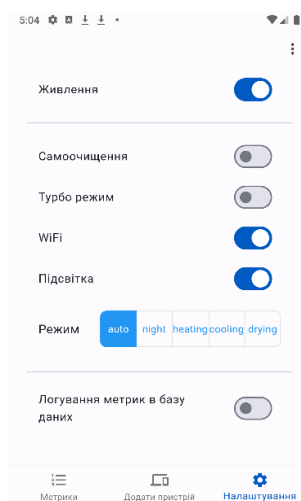


Рисунок 7 – Екран налаштувань

Висновок. Дослідження важливих аспектів безпеки Інтернету речей показало, що швидке розширення цієї технології має численні переваги, але також породжує серйозні проблеми безпеки. Було розглянуто різні методи автентифікації та авторизації, а також вивчили проблеми, пов'язані зі значним поширенням IoT пристроїв.

В роботі було розроблено програмну архітектуру, яка використовує досліджені технології для авторизації та автентифікації IoT пристроїв та користувачів, а також для безпечного зберігання даних і конфіденційності. Архітектура включає сервіс, що імітує поведінку IoT пристрою, API-сервіс в якості брокера повідомлень між клієнтом та пристроєм, і мобільний додаток для управління пристроєм.

Для авторизації API та пристрою використали технологію X.509 сертифікатів, а для авторизації користувача - протокол JSON Web Token (JWT) і стратегію входу за допомогою електронної пошти та пароля. Механізми автентифікації та реєстрації були реалізовані на платформі Firebase, а дані користувачів зберігались безпечно у хмарній базі даних Firestore від Google.

Список бібліографічного опису

1. Rose K. The internet of things: An overview / K. Rose, S. Eldridge, L. Chapin., 2015. – 53 с.
2. Authorization schemes for internet of things: requirements, weaknesses, future challenges and trends / K.Abid, A. Awais, A. Mansoor, S. Jadran., 2022. – (8).

3. Systematic Review of Authentication and Authorization Advancements for the Internet of Things / M.Trnka, A. S. Abdelfattah, A. Shrestha, M. Coffey., 2022.
4. Mohammad A. User Authentication and Authorization Framework in IoT Protocols / A. Mohammad, H. Al-Refai, A. A. Alawneh., 2022. – 147 c.
5. James A. Challenges for Database Management in the Internet of Things / A. James, C. Joshua., 2014. – 320 c. – (5).
6. Internet of Things Data Storage Infrastructure in the Cloud Using NoSQL Databases / [V. Brunno, M. Guilherme, F. Mauri та ін.], 2017. – 743 c. – (4).
7. Поліщук М.М., Костючко С.М., Христинець М.О. Порівняння методів оптимізації нейронних мереж на прикладі задачі класифікації зображень // Науковий журнал "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво" – Луцьк: Видавництво ЛНТУ. – Вип. 37. – 2019. – С. 43-52.
8. Поліщук, М., Повстяна, Ю., Ящук А., Ліщина, Н., Потейчук, М. Система радіоелектронної боротьби на базі Arduino UNO R3. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, (38), С. 10-16.
9. Поліщук, М., Гринюк, С. (2020). Використання технології шифрування інформації для безпечної передачі в мережі. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, (39), 122-126.
10. O. Maksymovych, T.Solyar, A.Sudakov, I.Nazar, M.Polishchuk. 2021. Determination of stress concentration near the holes under dynamic loadings, Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 3, pp. 19-25.
11. Костючко, С., Багнюк, Н., КузьмичО., Поліщук, М., & Кирилюк, Л. (2021). Біометрична ідентифікація засобами Python та Raspberry Pi. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, (42), С. 142-146.
12. Kostiuchko, S., Polishchuk, M., Zabolotnyi, O., Tkachuk, A., Twarog, B. The Auxiliary Parametric Sensitivity Method as a Means of Improving Project Management Analysis and Synthesis of Executive Elements / Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST this link is disabled, 2021, 395 LNICST, pp. 174–184.
13. Savaryn, P., Strekha, V., Brych, M., Kabak, V., Polishchuk, M. The Original Method of Controlling a Computer Using Distance Sensors. Proceedings - 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022, 2022, pp. 683–688.
14. S. Kostiuchko, O. Kuzmych, A. Aitouche, S. Grinyuk and O. Mekush, "Application of Parametric Sensitivity Method to Analysis of Automatic Mooring Winch with Electric Drive System," 2019 4th Conference on Control and Fault Tolerant Systems (SysTol), Casablanca, Morocco, 2019, pp. 294-299

References

1. Rose K. The internet of things: An overview / K. Rose, S. Eldridge, L. Chapin., 2015. – 53 c.
2. Authorization schemes for internet of things: requirements, weaknesses, future challenges and trends / K.Abid, A. Awais, A. Mansoor, S. Jadran., 2022. – (8).
3. Systematic Review of Authentication and Authorization Advancements for the Internet of Things / M.Trnka, A. S. Abdelfattah, A. Shrestha, M. Coffey., 2022.
4. Mohammad A. User Authentication and Authorization Framework in IoT Protocols / A. Mohammad, H. Al-Refai, A. A. Alawneh., 2022. – 147 c.
5. James A. Challenges for Database Management in the Internet of Things / A. James, C. Joshua., 2014. – 320 c. – (5).
6. Internet of Things Data Storage Infrastructure in the Cloud Using NoSQL Databases / [V. Brunno, M. Guilherme, F. Mauri та ін.], 2017. – 743 c. – (4).
7. Поліщук М.М., Костючко С.М., Христинець М.О. Порівняння методів оптимізації нейронних мереж на прикладі задачі класифікації зображень // Науковий журнал "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво" – Луцьк: Видавництво ЛНТУ. – Вип. 37. – 2019. – С. 43-52.
8. Polishchuk, M., Povstyana, Yu., Yashchuk A., Lyshchyna, N., Poteychuk, M. Electronic warfare system based on Arduino UNO R3. Computer-integrated technologies: education, science, production, (38), pp. 10-16.
9. Polishchuk, M., Hryniuk, S. (2020). Use of information encryption technology for secure transmission on the network. Computer-integrated technologies: education, science, production, (39), 122-126.
10. O. Maksymovych, T. Solyar, A. Sudakov, I. Nazar, M. Polishchuk. 2021. Determination of stress concentration near the holes under dynamic loadings, Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 3, pp. 19-25.
11. Kostiuchko, S., Bagniuk, N., Kuzmych O., Polishchuk, M., & Kirilyuk, L. (2021). Biometric identification using Python and Raspberry Pi. Computer-integrated technologies: education, science, production, (42), pp. 142-146.
12. Polishchuk, M., Zabolotnyi, O., Tkachuk, A., Twarog, B. The Auxiliary Parametric Sensitivity Method as a Means of Improving Project Management Analysis and Synthesis of Executive Elements / Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST this link is disabled, 2021, 395 LNICST, pp. 174–184.
13. Savaryn, P., Strekha, V., Brych, M., Kabak, V., Polishchuk, M. The Original Method of Controlling a Computer Using Distance Sensors. Proceedings - 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022, 2022, pp. 683–688.
14. S. Kostiuchko, O. Kuzmych, A. Aitouche, S. Grinyuk and O. Mekush, "Application of Parametric Sensitivity Method to Analysis of Automatic Mooring Winch with Electric Drive System," 2019 4th Conference on Control and Fault Tolerant Systems (SysTol), Casablanca, Morocco, 2019, pp. 294-299

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-13>

УДК 004.054

Прозур Віталій Олександрович, аспірант<https://orcid.org/0009-0000-2996-483X>

Інститут Прикладного Системного Аналізу, НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

АНАЛІЗ ВИДІВ ГЕНЕРАТИВНИХ ЗМАГАЛЬНИХ МЕРЕЖ

Прозур В.О. Аналіз видів генеративних змагальних мереж. У статті проаналізовано види генеративних змагальних мереж RNNGAN, WGAN, BiGAN. Розкрито їх структуру та компоненти. Зазначається, що у сучасних дослідженнях в галузі штучного інтелекту та обробки сигналів широко використовується підхід, що базується на використанні рекурентних нейронних мереж (RNN) та генеративних змагальних мереж (GAN). Однією з інноваційних концепцій в цій області є модель, відома як Recurrent Neural Network GAN. Запропоновано архітектуру мережі та математично представлено функцію втрат генератора та дискримінатора. Представлено модель Recurrent Conditional GAN, яка створена з метою генерації медичних даних, що є актуальним завданням у сучасних областях медичного дослідження та діагностики. В цьому підході використовується комбінація рекурентних нейронних мереж (RNN) та умовних генеративних змагальних мереж (cGAN). Запропоновано архітектуру мережі та математично представлено функцію втрат генератора та дискримінатора. Розкрито принципи мережі TimeGAN. Наголошується, що алгоритм TimeGAN включає в себе структуру, яка використовує елементи звичайних навчальних підходів GAN без учителя, а також підхід з учителем. Пропонується повна архітектура моделі TimeGAN та опис математичних функцій. Проаналізовано Bidirectional Generative Adversarial Networks (BiGAN), які представляють собою вид генеративних змагальних мереж, який включає кодувальник, додатково до звичайних компонентів генератора та дискримінатора, який перетворює реальні дані у латентний простір, в який вводиться генератор, фактично виконуючи обернену функцію порівняно з генератором. Зазначається, що тренування генеративно-змагальних мереж (GAN) представляє собою досить складне завдання. Існує можливість, що моделі можуть не збігтися до оптимального стану. Представлений аналіз підкреслює багатообіцяючі перспективи та різноманітність описаних підходів, що можуть сприяти подальшому розвитку галузей, де вони застосовуються, від медицини до мистецтва та інженерії.

Ключові слова: змагальна мережа, аналіз, алгоритм, нейронна мережа, дискримінатор, генератор, дані.

Prozur Vitalii. Analysis of types of generative competitive networks. The article analyzes the types of generative competitive networks RNNGAN, WGAN, BiGAN. Their structure and components are disclosed. It is noted that in modern research in the field of artificial intelligence and signal processing, an approach based on the use of recurrent neural networks (RNN) and generative adversarial networks (GAN) is widely used. One of the innovative concepts in this area is a model known as Recurrent Neural Network GAN. The architecture of the network is proposed and the loss function of the generator and discriminator is presented mathematically. The Recurrent Conditional GAN model is presented, which was created for the purpose of generating medical data, which is an urgent task in the modern fields of medical research and diagnostics. This approach uses a combination of recurrent neural networks (RNNs) and conditional generative adversarial networks (cGANs). The architecture of the network is proposed and the loss function of the generator and discriminator is presented mathematically. The principles of the TimeGAN network are disclosed. It is emphasized that the TimeGAN algorithm includes a framework that uses elements of conventional unsupervised GAN training approaches as well as a tutored approach. A complete architecture of the TimeGAN model and a description of the mathematical functions are offered. Bidirectional Generative Adversarial Networks (BiGAN) are analyzed, which are a type of generative adversarial networks that includes an encoder, in addition to the usual generator components and a discriminator, which transforms real data into a latent space into which the generator is input, actually performing the inverse function compared to the generator. It is noted that training generative-competitive networks (GAN) is a rather difficult task. There is a possibility that the models may not converge to the optimal state. The presented analysis highlights the promising prospects and diversity of the described approaches, which can contribute to the further development of the fields where they are applied, from medicine to art and engineering.

Key words: adversarial network, analysis, algorithm, neural network, discriminator, generator, data.

Вступ та постановка проблеми. З появою генеративних змагальних мереж (GAN) у 2014 році, що були розроблені Яном Гудфеллоу та його співавторами, відбувся значний прогрес у полі покращень та модифікацій даного алгоритму.

Заснований на концепції двох конкуруючих нейронних мереж, GAN призначає одну мережу для генерації даних, а іншу – для оцінки їх автентичності. Ця взаємодія створює внутрішній механізм змагання, що сприяє навчанню генеративної мережі (генератор) створювати дедалі більш реалістичні дані, в той час як дискримінативна мережа (дискримінатор) вчиться краще відрізняти справжні дані від створених.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукова база щодо теми дослідження доволі широка. Так Я. О. Ісаєнков та О. Б. Мокін [1] здійснили аналіз генеративних моделей глибокого

навчання та особливостей їх реалізації на прикладі WGAN. Авторами представлено особливості будови, навчання та сфери застосування генеративних моделей глибокого навчання. До основних завдань таких моделей відносяться генерування даних (зображень, музики, текстів, відео), перенесення стилів з одних даних на інші, поліпшення якості даних, їх кластеризація, пошук аномалій тощо. Науковці зазначають, що результати роботи генеративних моделей, окрім поширених розважальних цілей, можуть використовуватися як: додаткові дані для навчання інших моделей машинного навчання, джерела нових ідей для творчих професій, інструменти анонімізації чутливих даних тощо.

Робота [2] присвячена застосуванню генеративних змагальних нейронних мереж на прикладі розв'язку задачі інтелектуальної колоризації зображень. В основі розробленої програмної системи для інтелектуальної колоризації лежить робота двох конкуруючих згорткових нейронних мереж: мережі-генератора та мережі-дискримінатора.

Стосовно неконтрольованих генеративних моделей варто відмітити роботу [3]. Авторами розглянуто використання алгоритму гармонійного пошуку в нейронних мережах для покращення виявлення шахрайства в банківській системі. З'ясовано, що, хоча дана модель має перевагу у спроможності до навчання на основі минулої поведінки, є труднощі в тривалій обробці великої кількості нейронних мереж. Також наведено етапи реалізації моделі. Крім того, проаналізовано моделювання виявлення шахрайства з кредитними картками на базі використання двох типів моделей: під наглядом і без нагляду. До моделей під наглядом віднесено логістичну регресію, К найближчі сусіди, екстремальне підвищення градієнта. Серед неконтрольованих генеративних моделей розглянуто однокласну опорну векторну модель, обмежену модель Больцмана, генеративно-змагальну мережу.

У статті [4] розглянуто основні шляхи використання нейронних мереж та методів машинного навчання різних типів у комп'ютерних відеоіграх. Машинне навчання та нейромережі – гарячі теми в багатьох технологічних галузях. Одна з них – створення комп'ютерних ігор, де нові інструменти використовуються для того, щоб зробити ігри цікавіше. Ремастерінг і модифікації ігор нейронними мережами стали новим трендом. Проводяться дослідження з корекції кольору та світла, анімації персонажів у реальному часі та керування їхньою поведінкою. Розглянуто основні типи нейронних мереж, які можуть навчатися таким функціям.

Із зарубіжних авторів варто відмітити роботи таких науковців як: Т. Каррас, С. Лайне, М. Айтгала, Дж. Хеллстен, Й. Лехтінен і Т. Айла [5], М. Пасіні [6], Є. Сулема, І. Дичка, О. Сулема [7], Хорн К. Дж., Булл Л., Гіфтед-Пезуа О. [8], Шаббір А., Шабір М., Джавед А. Р., Чакраборті К., Різван М. [9], Д. Кроче, Г. Кастеллуччі та Р. Базілі [10], К. Се, Дж. Ван, З. Чжан, З. Рен, А. Юйле [11], Л. Лю, Ю. Лу, М. Ян, Цюй, Жу Чжу та Х. Лі [12], Д. Якубовіц, Р. Жир'ес [13], Х. Зенаті, К. С. Фу, Б. Лекуа, Г. Манек та В. Р. Чандрасекар [14]. та інших.

Однак незважаючи на масштабність наукових досліджень питання актуальності даної роботи не викликає сумнівів.

Постановка завдання. Метою дослідження є аналіз різних видів GAN (такі як RNNGAN, WGAN, ViGAN, тощо), який розкриє їхню структуру та компоненти.

Викладення основного матеріалу дослідження. В умовах сьогодення, генеративні моделі стають все більш популярними та виходять за рамки наукового пізнання. Їх застосування формується на базі широкого спектру задач. Розглянемо основні моделі генеративних змагальних мереж для усвідомлення їх структури та компонентів.

C-RNNGAN

Recurrent Neural Network GAN. У сучасних дослідженнях в галузі штучного інтелекту та обробки сигналів широко використовується підхід, що базується на використанні рекурентних нейронних мереж (RNN) та генеративних змагальних мереж (GAN). Однією з інноваційних концепцій в цій області є модель, відома як Recurrent Neural Network GAN.

Ця архітектура нейронної мережі поєднує в собі властивості RNN, які дозволяють моделювати та узагальнювати послідовність даних, та GAN, які забезпечують можливість генерації нових даних. Важливо зазначити, що початково RNN GAN створена автором для аналізу аудіосигналів як часових

рядів, де кожен відтинок аудіо сприймається як точка в часі, а послідовність таких точок утворює основу для створення музичних фрагментів.

Архітектура C-RNNGAN

Генератор – це RNN, а дискримінатор – двонаправлений RNN, завдяки чому дискримінатор може сприймати контекст послідовності в обох напрямках. Загальну структуру мережі можна побачити на рисунку 1.

Функція втрат C-RNNGAN

Функція втрат генератора:

$$L_G = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \log(1 - D(G(z^{(i)})))$$

Функція втрат дискримінатора:

$$L_D = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [-\log D(x^{(i)}) - \log(1 - D(G(z^{(i)})))]$$

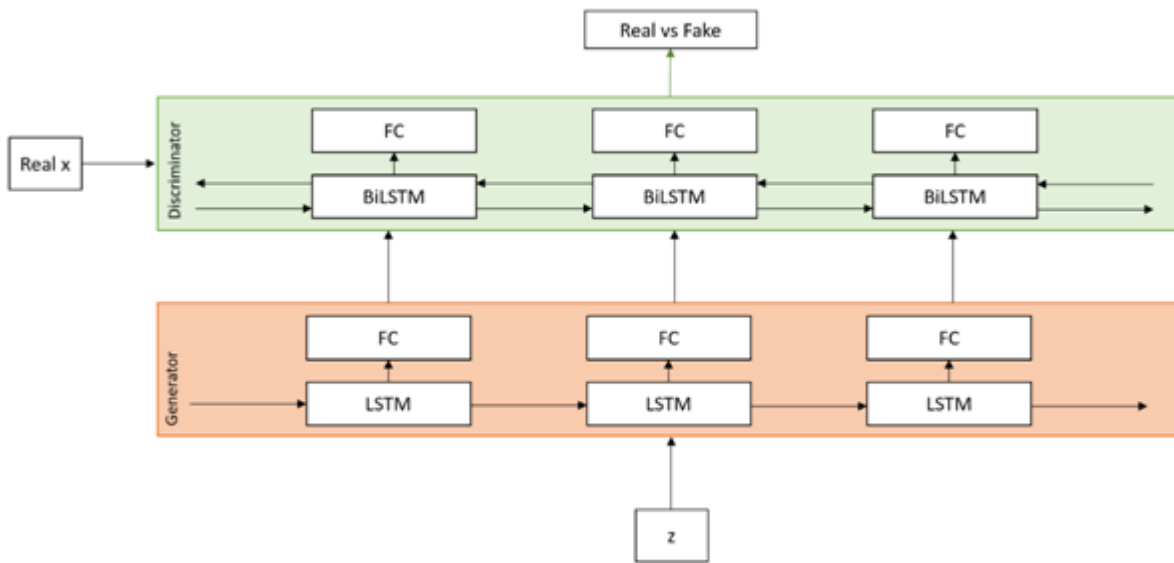


Рисунок 1 – Архітектура C-RNNGAN

RCGAN

Представлено модель Recurrent Conditional GAN, створена з метою генерації медичних даних, що є актуальним завданням у сучасних областях медичного дослідження та діагностики. В цьому підході використовується комбінація рекурентних нейронних мереж (RNN) та умовних генеративних змагальних мереж (cGAN), що дозволяє не тільки створювати реалістичні медичні дані, але і контролювати їхні характеристики залежно від вхідних параметрів.

Рекурентні нейронні мережі дозволяють моделювати залежності у часових послідовностях, що є важливим для медичних даних, де часові та просторові фактори можуть мати визначальний вплив на клінічні показники. Умовні GAN додають до процесу генерації додатковий рівень контролю, дозволяючи враховувати конкретні характеристики пацієнтів або клінічні сценарії.

Архітектура RCGAN

Архітектурно, модель RCGAN відрізняється від RNN-GAN. Незважаючи на використання RNN LSTM у RCGAN, дискримінатор відрізняється своєю односпрямованою структурою, тому результати G не передаються як вхідні дані на наступний часовий крок.

Додатково, відзначається, що RCGAN приймає вхідний вектор x як умовний вектор для послідовності та оптимізується відносно цього вектора. Генеральну конфігурацію моделі наведено на рисунку 2.

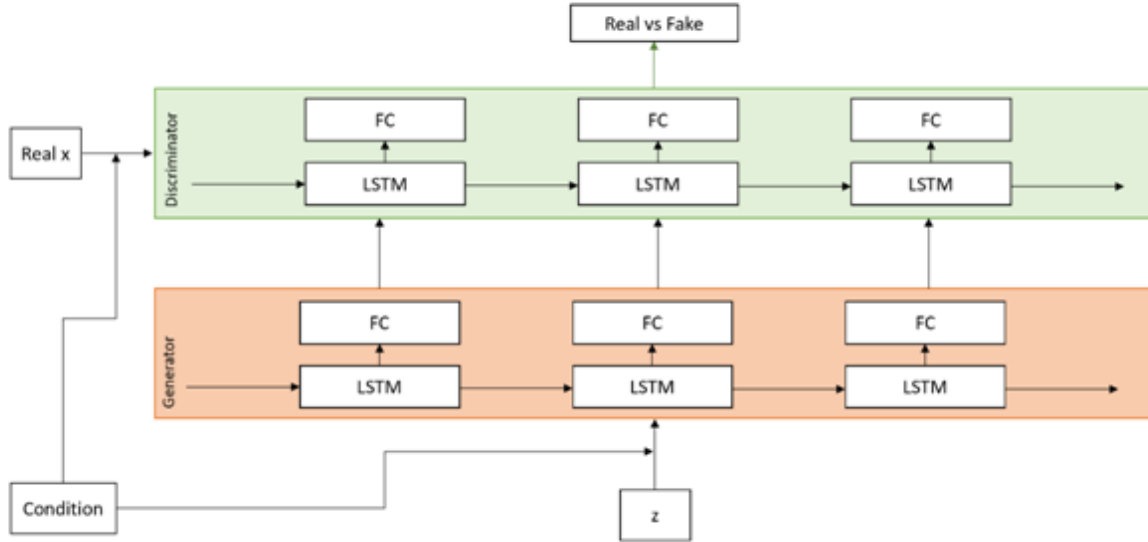


Рисунок 2 – Загальна архітектура RCGAN та її розширена версія

Функція втрат RCGAN

Функція втрат генератора:

$$L_G = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \log(1 - D(G(z^{(i)})))$$

Функція втрат дискримінатора:

$$L_D = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [-\log D(x^{(i)}) - \log(1 - D(G(z^{(i)})))]$$

TimeGAN

Основною ціллю автора було створення моделі, яка здатна відтворювати взаємозв'язки в послідовностях, одночасно зберігаючи всі статистичні характеристики цих послідовностей. Алгоритм TimeGAN включає в себе структуру, яка використовує елементи звичайних навчальних підходів GAN без учителя, а також підхід з учителем. Шляхом поєднання неконтрольованої мережі GAN з контрольованою авторегресійною моделлю, дана архітектура націлена на генерацію часових рядів, які зберігають їхню індивідуальну часову динаміку.

Архітектура TimeGAN

Архітектурно, ця модель складається із п'яти основних складових: генератора, дискримінатора, супервайзера, інкодера та декодера.

Ця модель дотримується концепції латентного простору GAN, що дозволяє використовувати інкодер та декодер для трансформації вхідних даних у цей код, а завдяки присутності супервайзера, досягається можливість навчання з учителем, що сприяє прискоренню процесу навчання моделі.

Кожна з окремих компонент цієї моделі реалізована за допомогою рекурентних нейронних мереж з використанням комірок GRU.

Повна архітектура моделі TimeGAN наведена на рисунку 3.

Функції втрат TimeGAN

Ця модель має 3 функції втрат: функцію втрат декодування (reconstruction loss), функцію без та з наглядом (unsupervised та supervised loss).

Reconstruction loss:

$$\mathcal{L}_R = MSE[x, De(E(x))]$$

Unsupervised loss:

$$\mathcal{L}_U = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[-\log D(x^{(i)}) - \log(1 - D(G(z^{(i)})) \right],$$

Supervised loss:

$$\mathcal{L}_S = MSE[E(x), G(z)]$$

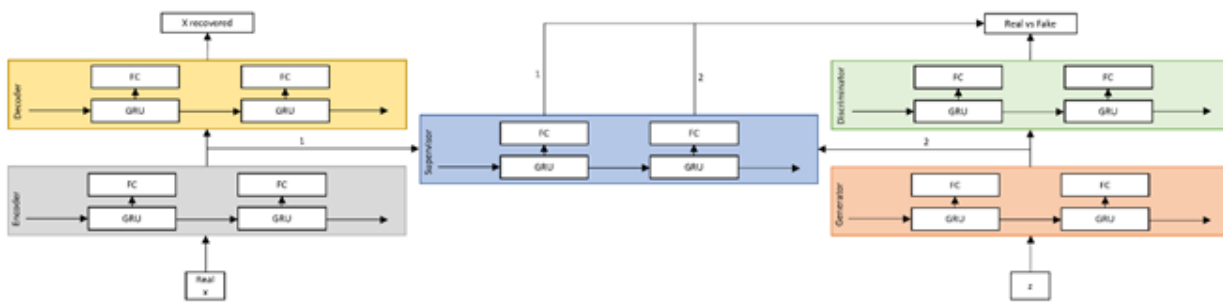


Рисунок 3 – Архітектура моделі TimeGAN

BiGAN

Bidirectional Generative Adversarial Networks (BiGAN) представляють собою вид генеративних змагальних мереж, який включає кодувальник, додатково до звичайних компонентів генератора та дискримінатора, який перетворює реальні дані у латентний простір, в який вводиться генератор, фактично виконуючи обернену функцію порівняно з генератором.

Архітектура BiGAN

Таким чином, архітектура BiGAN розширює звичайний GAN, включаючи кодер $E(x)$ до генератора $G(z)$. У цьому підході дискримінатор опрацьовує не лише вхідні дані (x – реальні дані та $G(z)$ – згенеровані дані), а також і інформацію з латентного простору ($E(x)$ – вихід кодера, z – вхід генератора), що призводить до роботи з парами $(x, E(x))$ – для реальних даних, та $(G(z), z)$ – для згенерованих даних. Загальну архітектуру можна побачити нижче.

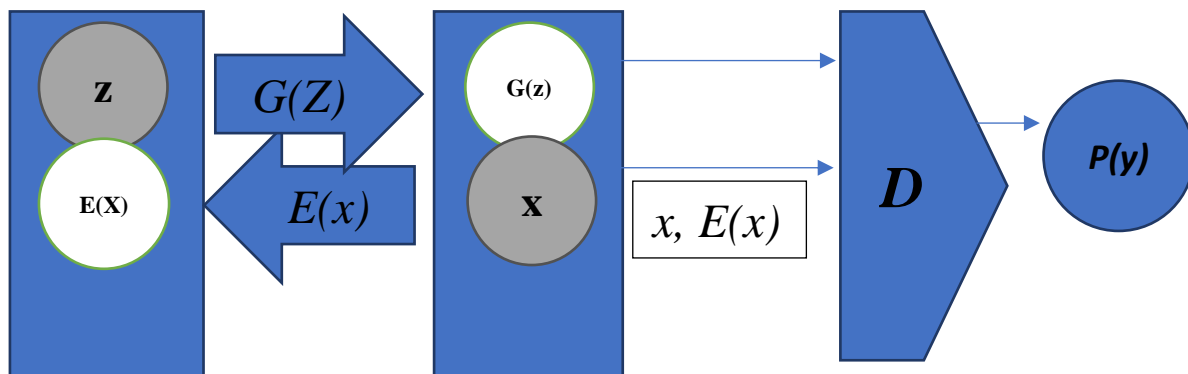


Рисунок 4 – Загальна архітектура BiGAN

Функція втрат BiGAN

Мета навчання BiGAN, може бути сформуована як задача мінімаксу:

$$\min_{G,E} \max_D V(D, E, G)$$

де

$$V(D, E, G) := \mathbb{E}_{x \sim p_x} \left[\underbrace{\mathbb{E}_{z \sim \rho_{E(\cdot|x)}} [\log D(x, z)]}_{\log D(x, E(x))} \right] + \mathbb{E}_{z \sim p_z} \left[\underbrace{\mathbb{E}_{x \sim \rho_{G(\cdot|z)}} [\log(1 - D(x, z))]}_{\log(1 - D(G(z), z))} \right]$$

Wasserstein GAN

Тренування генеративно-змагальних мереж (GAN) представляє собою досить складне завдання. Існує можливість, що моделі можуть не збігтися до оптимального стану.

Основна мета, яка лежить в основі підходу GAN, полягає в тому, щоб генератор почав перетворювати випадковий шум у тип даних, який ми бажаємо імітувати. Для досягнення цієї мети, ідея порівняння подібності між двома розподілами є надзвичайно важливою в рамках GAN. Серед найбільш широко використовуваних метрик для порівняння розподілів можна виділити:

JS Дивергенція (Йенсен – Шеннон) –

$$D_{JS}(p|q) = \frac{1}{2} D_{KL} \left(p \left| \frac{p+q}{2} \right. \right) + \frac{1}{2} D_{KL} \left(q \left| \frac{p+q}{2} \right. \right)$$

Розбіжність KL(Kullback – Leibler) –

$$D_{KL}(p|q) = \int_x p(x) \log \frac{p(x)}{q(x)} dx. D_{KL}$$

дорівнює нулю, коли $p(x)$ дорівнює $q(x)$.

Розбіжність JS обмежена 0 і 1, і, на відміну від розбіжності KL, симетрична і плавна, а отже її використання зазвичай є більш доцільним.

Функція втрат WGAN

WGAN же натомість використовує відстань Вассерштайна:

$$\mathcal{W}(p_r, p_g) = \frac{1}{L} \sup_{f \in \mathcal{L}} \left(\mathbb{E}_{x \sim p_r} [f(x)] - \mathbb{E}_{x \sim p_g} [f(x)] \right)$$

як функцію втрат. Порівняно з розбіжностями KL та JS, метрика Вассерштайна дає плавний показник (без різких стрибків розбіжностей). Це робить його набагато більш придатним для створення стабільного навчального процесу під час градієнтного спуску.

Крім того, порівняно з KL та JS, відстань Вассерштайна майже скрізь диференціюється. Як ми знаємо, під час зворотного поширення ми диференціюємо функцію втрат, щоб створити градієнти, які, в свою чергу, оновлюють ваги. Тому наявність диференційованої функції втрат є досить важливою.

Висновки. В даній статті були детально проаналізовані різні види генеративних змагальних мереж, включаючи WGAN, C-RNNGAN, RCGAN, TIMEGAN та BiGAN. Кожен з цих підходів приносить унікальні інновації у галузі генерації та моделювання даних.

WGAN вирішує проблему стійкості навчання GAN із застосуванням функції втрати Вассерштайна. C-RNNGAN використовує рекурентні мережі для генерації послідовних даних, що дозволяє досягти вражаючої якості в музичному контенті. RCGAN пропонує новітній підхід, де рекурентні мережі використовуються для аналізу та генерації медичних даних.

TIMEGAN розширює можливості у генерації часових рядів, узгоджуючи неконтрольовану GAN з контрольованою авторегресійною моделлю. Нарешті, BiGAN розширює стандартну архітектуру GAN, додавши кодувальник для отримання зворотних перетворень даних.

Цей аналіз підкреслює багатообіцяючі перспективи та різноманітність даних підходів, що можуть сприяти подальшому розвитку галузей, де вони застосовуються, від медицини до мистецтва та інженерії.

Список бібліографічного опису

1. Ісаєнков Я. О., Мокін О. Б. Аналіз генеративних моделей глибокого навчання та особливостей їх реалізації на прикладі WGAN. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2022. № 1. С. 82-94. DOI [10.31649/1997-9266-2022-160-1-82-94](https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-82-94)

2. Сулема С. С., Топчів Б. С. Интеллектуальна колоризація зображень за допомогою генеративних змагальних мереж. «Системні технології» «System technologies», 2019. № 5 (124). С. 94-103. DOI 10.34185/1562-9945-5-124-2019-09
3. Аналіз математичних моделей протидії банківським кібершахрайствам / Кузьменко О. В., Яровенко Г. М., Скринька Л.О. // Вісник СумДУ. Серія «Економіка», 2022. № 2°. С. 111-120. DOI:10.21272/1817-9215.2022.2-13
4. Сеніва К. Р. Способи використання нейронних мереж та машинного навчання в комп'ютерних іграх. Вісник Хмельницького національного університету, 2021. №2 (295). С. 97-100. DOI 10.31891/2307-5732-2021-295-2-97-100.
5. T. Karras, S. Laine, M. Aittala, J. Hellsten, J. Lehtinen, and T. Aila, "Analyzing and Improving the Image Quality of StyleGAN," 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020, pp. 8107-8116. <http://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.00813>.
6. M. Pasini, "MelGAN-VC: Voice Conversion and Audio Style Transfer on arbitrarily long samples using Spectrograms," in arXiv e-prints, 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1910.03713.pdf>.
7. Ye. Sulema, I. Dychka, O. Sulema, "Multimodal Data Representation Models for Virtual, Remote, and Mixed Laboratories Development"//Lecture Notes in Networks and Systems.–Springer Cham, 2018. – Vol. 47, pp. 559-569.
8. Horna C. J., Toro L., Regalado-Pezua O. Silver bank: Vulnerability and risks during cyberattacks. Emerald Emerging Markets Case Studies. 2022. Vol. 12, no. 1. P. 1-33. DOI: 10.1108/EEMCS-02-2021-0034.
9. Shabbir A., Shabir M., Javed A. R., Chakraborty C., Rizwan M. Suspicious transaction detection in banking cyber-physical systems. Computers and Electrical Engineering. 2022. Vol. 97. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2021.107596.
10. D. Croce, G. Castellucci, and R. Basili, "GAN-BERT: Generative Adversarial Learning for Robust Text Classification with a Bunch of Labeled Examples," in Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2020, pp. 2114–2119. <https://doi.org/10.18653/v1/2020.acl-main.191>.
11. Mitigating Adversarial Effects Through Randomization. / C. Xie, J. Wang, Z. Zhang, Z. Ren, A. Yuille // Proceedings of the International Conference on Learning Representations, Toulon, France, 24–26 April 2017. 2017. P. 1–16. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.01991>.
12. L. Liu, Y. Lu, M. Yang, Q. Qu, J. Zhu, and H. Li, "Generative Adversarial Network for Abstractive Text Summarization," in arXiv e-prints, 2017. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1711.09357.pdf>.
13. Jakubovitz D. Improving DNN Robustness to Adversarial Attacks using Jacobian Regularization / D. Jakubovitz, R. Giryes // Proceedings of the European Conference on Computer Vision, Munich, Germany, 8-14 Sept. 2018. 2018. P. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.08680>.
14. H. Zenati, C. S. Foo, B. Lecouat, G. Manek, and V. R. Chandrasekhar, "Efficient GAN-Based Anomaly Detection," in arXiv e-prints, 2018. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1802.06222.pdf>.

References

1. T. Karras, S. Laine, M. Aittala, J. Hellsten, J. Lehtinen, and T. Aila, "Analyzing and Improving the Image Quality of StyleGAN," 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020, pp. 8107-8116. <http://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.00813>.
2. M. Pasini, "MelGAN-VC: Voice Conversion and Audio Style Transfer on arbitrarily long samples using Spectrograms," in arXiv e-prints, 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1910.03713.pdf>.
3. Ye. Sulema, I. Dychka, O. Sulema, "Multimodal Data Representation Models for Virtual, Remote, and Mixed Laboratories Development"//Lecture Notes in Networks and Systems.–Springer Cham, 2018. – Vol. 47, pp. 559-569.
4. Horna C. J., Toro L., Regalado-Pezua O. Silver bank: Vulnerability and risks during cyberattacks. Emerald Emerging Markets Case Studies. 2022. Vol. 12, no. 1. P. 1-33. DOI: 10.1108/EEMCS-02-2021-0034.
5. Shabbir A., Shabir M., Javed A. R., Chakraborty C., Rizwan M. Suspicious transaction detection in banking cyber-physical systems. Computers and Electrical Engineering. 2022. Vol. 97. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2021.107596.
6. D. Croce, G. Castellucci, and R. Basili, "GAN-BERT: Generative Adversarial Learning for Robust Text Classification with a Bunch of Labeled Examples," in Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2020, pp. 2114–2119. <https://doi.org/10.18653/v1/2020.acl-main.191>.
7. Mitigating Adversarial Effects Through Randomization. / C. Xie, J. Wang, Z. Zhang, Z. Ren, A. Yuille // Proceedings of the International Conference on Learning Representations, Toulon, France, 24–26 April 2017. 2017. P. 1–16. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.01991>.
8. L. Liu, Y. Lu, M. Yang, Q. Qu, J. Zhu, and H. Li, "Generative Adversarial Network for Abstractive Text Summarization," in arXiv e-prints, 2017. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1711.09357.pdf>.
9. Jakubovitz D. Improving DNN Robustness to Adversarial Attacks using Jacobian Regularization / D. Jakubovitz, R. Giryes // Proceedings of the European Conference on Computer Vision, Munich, Germany, 8-14 Sept. 2018. 2018. P. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.08680>.
10. H. Zenati, C. S. Foo, B. Lecouat, G. Manek, and V. R. Chandrasekhar, "Efficient GAN-Based Anomaly Detection," in arXiv e-prints, 2018. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1802.06222.pdf>.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-14>

УДК 004.2

Скілков Нікіта Володимирович, аспірант,

<https://orcid.org/0009-0001-3022-1862>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПІДЗАДАЧ В БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Скілков Н.В. Дослідження часових характеристик підзадач в багатопроекторних системах реального часу. У статті проведено дослідження часових характеристик підзадач в багатопроекторних системах реального часу. Зазначається, що системами реального часу це системи, в яких поряд з логічною правильністю обчислювального процесу необхідно забезпечувати також своєчасність його протікання. Наголошено, що весь спектр функціональних можливостей представляється як набір простіших завдань, до виконання яких вибираються процесорні елементи. При формуванні кожного процесорного елемента обов'язковим є дисципліна планування, відповідно до якої проводиться аналіз часових вимог задач. Підкреслено, що організація обчислень, враховує часовий розкид часу виконання, при якому завдання з великим розкидом розбиваються на дві підзадачі, перша з яких виконується за час, що не перевищує середнього часу виконання вихідної задачі, а друга являє собою залишок її виконання. Математично сформовано головну задачу направлену на виконання та наведено алгоритм її розбиття на підзадачі. Перша підзадача планується аналогічно до інших задач з детермінованими характеристиками, а друга ставиться в чергу до спорадичного серверу. Показано, що за допомогою подібних перетворень вдається досягти вищої ефективності використання процесорів. Наголошується, що кожен задачу можна представити сукупністю деяких елементарних блоків, кожен з яких описується своїм профілем часу виконання. Доведено лему, щодо набору задач який складається зі спорадичних задач з обмеженим терміном виконання та може плануватися на кількох ідентичних процесорах для будь-якого алгоритму збереження роботи. Зазначається, що перешкоди у виконанні підзадачі мають два основних джерела. Для того, щоб будь-яка підзадача могла бути запланована, часу її виконання має бути достатньо для її виконання плюс враховується робоче навантаження перешкод. Підкреслено, що головною умовою успішного планування паралельного виконання підзадач є формування низки додаткових локальних параметрів.

Ключові слова: багатопроекторна система, задача, підзадача, швидкодія, паралельність, ефективність, розподіл, планування, реальний час, черга, алгоритм.

Skilkov N.V. Study of time characteristics of subtasks in real-time multiprocessor systems. The article examines the time characteristics of subtasks in real-time multiprocessor systems. It is noted that real-time systems are systems in which, along with the logical correctness of the computing process, it is also necessary to ensure the timeliness of its flow. It is emphasized that the entire range of functionality is presented as a set of simpler tasks, for the execution of which processor elements are selected. When forming each processor element, planning discipline is mandatory, according to which the time requirements of the tasks are analyzed. It is emphasized that the organization of calculations takes into account the time spread of the execution time, in which tasks with a large spread are divided into two subtasks, the first of which is completed in a time that does not exceed the average time of the original task, and the second represents the remainder of its execution. The main task directed to execution is mathematically formed and the algorithm for dividing it into subtasks is given. The first subtask is scheduled similarly to other tasks with deterministic characteristics, and the second is queued to the sporadic server. It is shown that with the help of such transformations it is possible to achieve a higher efficiency of the use of processors. It is emphasized that each task can be represented by a set of some elementary blocks, each of which is described by its execution time profile. A lemma is proved for a set of tasks that consists of sporadic tasks with a limited execution time and can be scheduled on several identical processors for any job-saving algorithm. It is noted that there are two main sources of obstacles in the performance of the subtask. In order for any subtask to be scheduled, its execution time must be sufficient to complete it plus the workload of obstacles. It is emphasized that the main condition for successful planning of parallel execution of subtasks is the formation of a number of additional local parameters.

Key words: multiprocessor system, task, subtask, speed, parallelism, efficiency, distribution, scheduling, real time, queue, algorithm.

Вступ та постановка проблеми. В останні роки продуктивність систем підвищують за рахунок збільшення швидкості однопроекторних систем, що пов'язано зі зменшенням розміру чіпів, та призводить до проблем з нагріванням. Багатопроекторні системи розглядаються як одне з рішень для подолання цих фізичних обмежень шляхом збільшення можливостей виконання завдань за допомогою паралелізму процесорів.

Використання паралелізму в програмному забезпеченні робить їх сумісними з багатопроекторним обладнанням, оскільки обчислення паралельних додатків виконуються на кількох процесорах одночасно.

У системах реального часу планування паралельних завдань на багатопроекторних системах є складною проблемою, а розширення умов планування однопроекторних систем на паралельні багатопроекторні системи не є тривіальним. Аналіз планування однопроекторних

систем можна розділити на дві основні категорії: або шляхом перетворення обмежень черговості завдань у незалежні послідовні завдання, які виконуються на багатопроцесорних системах, або шляхом планування паралельних завдань безпосередньо за допомогою адаптованих алгоритмів планування. Перший метод спрощує планування ціною втрати деяких характеристик паралельних завдань, оскільки він усуває залежності підзадач, щоб потім можна було використовувати класичні алгоритми планування. Необхідність синхронізації між паралельними завданнями та процесорами ускладнює процес планування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формулювання наукової думки в окреслі планування паралельних завдань в багатопроцесорних системах реального часу є різномірним та масштабним. У сучасній науковій площині з'являються роботи присвячені механізмам та принципам застосування багатопроцесорних систем та підвищення їх швидкодії. Здебільшого наукові роботи зосереджені на традиційній моделі виконання послідовних незалежних завдань у реальному часі. Так, В. Г. Зайцев та Є. І. Цибаєв [1] здійснили оцінку часових характеристик задач в багатопроцесорних системах реального часу з використанням сіток Петрі. Авторами запропоновано метод оцінювання часових характеристик задач в системах реального часу шляхом аналізу даних, отриманих шляхом моделювання розподілу процесорного часу між задачами згідно обраних алгоритмів планувальника з використанням моделі сіток Петрі для багатопроцесорних систем.

А. І. Косолап та Н. С. Волинець [2] запропонували метод точної квадратичної регуляризації для розв'язання задач оптимального розподілення ресурсів. Проведені чисельні експерименти засвідчують значну перевагу методу точної квадратичної регуляризації над існуючими методами.

Алгебри алгоритмів для моделювання розподілу ресурсів в ІТ проектах висвітлили А. Василюк та Т. Басюк [3]. Результатом роботи науковців став прототип програмного забезпечення, що реалізує моделювання розподілу ресурсів із використанням методу Балаша та апарату алгебри алгоритмів.

Ю. С. Клушин [4] провів оцінювання надійності паралельних обчислювальних систем під час виконання заданого комплексу взаємопов'язаних робіт. Це оцінювання безпосередньо пов'язане з ефективністю використання обчислювальних систем.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Джастіна Ікумола, Камхіє Манар, Джордж Лоран, Мідоннет Серж [5], Куо Чін-Фу, Лінь Цзянь-Сін, Лу Юнг-Фен [6], Донг Чжен, Лю Конг [7], Гавідель Абольфазл [8], Куо Чін-Фу, Чень Цзу-Чіє [9], Сунь Чженью, Го Мен'їн, Лю Сінгу [10], Тейшейра Рікардо, Ліма Джордж [11], Ісмаїл Хабіба, Джававі Даянг, Ахмеді Ісмаїл [12], Баруа Санджой, Бертонья Марко, Буттаццо Джорджо [13], Кумар Аджитеш [14] та інші.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за окресленою тематикою, питання дослідження часових характеристик підзадач в багатопроцесорних системах реального часу залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Постановка завдання. Дослідити часові характеристики підзадач в багатопроцесорних системах реального часу.

Викладення основного матеріалу дослідження. Нехай є набір задач τ з n задачами зі спрямованим ациклічним графом (DAG), запланованих на m ідентичних процесорах. Кожне завдання τ_i DAG являє собою спорадичний граф з обмеженим терміном виконання, що складається з n_i підзадач з обмеженнями пріоритету.

Завдання τ_i DAG є можливість представити як:

$$n_i, \{1 \leq j \leq n_i | \tau_{i,j}\}, G_i, D_i, T_i$$

де n_i – кількість підзадач,

$1 \leq j \leq n_i | \tau_{i,j}$ – набір підзадач,

G_i – набір спрямованих зв'язків між підзадачами,

D_i – це відносний термін виконання τ_i ,

T_i – це мінімальний час між надходженнями послідовних завдань.

Нехай $\tau_{i,j}$ позначає j -у підзадачу з безлічі підзадач, що утворюють задачу DAG τ_i , де $1 \leq j \leq n_i$. Кожна підзадача $\tau_{i,j}$ – це однопотокове завдання, яке має єдиний параметр синхронізації, який є найгіршим часом виконання (WCET) $C_{i,j}$. Підзадачі завдання τ_i DAG успадковують період і кінцевий термін виконання свого DAG.

Нехай $g_{i,k}^{i,j} \in G_i$ являють собою прямий зв'язок від підзадачі $\tau_{i,j}$ до $\tau_{i,k}$. Прямий зв'язок між підзадачею $\tau_{i,j}$ і $\tau_{i,k}$ означає, що підзадача $\tau_{i,k}$ не може почати своє виконання, поки підзадача $\tau_{i,j}$ не завершить виконання. У цьому випадку підзадача $\tau_{i,j}$ називається батьківською підзадачею $\tau_{i,k}$, де

$$\tau_{i,j} \in \text{parents}(\tau_{i,k}) \in \text{pred}(\tau_{i,k})$$

де $\text{pred}(\tau_{i,k})$ – це набір усіх попередників підзадачі $\tau_{i,k}$ DAG які повинні виконуватися опосередковано перед $\tau_{i,k}$. Аналогічно, підзадача $\tau_{i,k} \in \text{children}(\tau_{i,j})$ називається дочірньою підзадачею $\tau_{i,j}$, а безліч всіх наступників $\tau_{i,k}$ позначається $\text{succ}(\tau_{i,k})$. Підзадача $\tau_{i,j}$ може містити нуль або більше батьківських / дочірніх підзадач. Початкова підзадача не має батьківських підзадач, а підзадача-приймач – це підзадача без будь-яких наступників.

Нехай C_i позначає загальний WCET завдання τ_i DAG, де $C_i = \sum_{k=1}^{n_i} C_{i,k}$. Нехай L_i позначає довжину критичного шляху завдання τ_i DAG, яка визначається як найдовший шлях виконання в τ_i , коли вона виконується на платформі з нескінченною кількістю процесорів.

Є можливість припустити, що кожне завдання DAG τ_i генерує нескінченну послідовність завдань. Нехай J_i^k це k -те завдання DAG τ_i , яке характеризується (r_i, d_i) , де r_i – час виконання завдання, а d_i – його абсолютний крайній термін. Кожне завдання DAG J_i^k складається з набору підзадач, кожна з яких позначається як $J_{i,j}^k, j \in 1 \dots n_i$.

На рисунку 1 наведено схему реалізації задачі DAG τ_1 , яка складається з 6 підзадач. Підзадача $\tau_{1,1}$ є джерелом DAG, а $\tau_{1,6}$ – її приймачем. Лінії на рисунку являють собою спрямовані обмеження пріоритету між підзадачами. Критичний шлях τ_1 дорівнює $\{\tau_{1,1}, \tau_{1,2}, \tau_{1,6}\}$, а його довжина дорівнює $L_i = 6$. Для підзадачі $\tau_{1,5}$ її батьківською підзадачею є $\tau_{1,3}$, тоді як $\tau_{1,1}$ є однією з її попередниць.

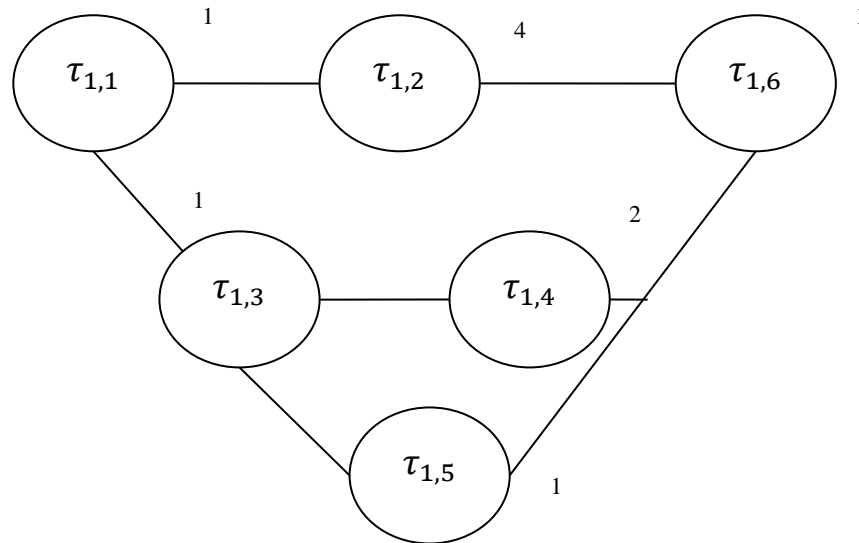


Рисунок 1 – Схема реалізації задачі DAG τ_1

Для будь-якого набору задач DAG існують дві необхідні базові умови, якщо хоча б одна з них хибна, набір завдань неможливий:

$$\sum_{\tau_i \in \tau} \frac{C_i}{T_i} \leq m$$

$$\forall \{\tau_i \in \tau\}: L_i \leq D_i$$

Для описаного набору формування задачі проаналізуємо можливість планування з використанням будь-якого глобального алгоритму планування зі збереженням роботи. Глобальний алгоритм допускає міграцію завдань і переважне завантаження між процесорами, в той час як

алгоритм збереження роботи не дозволяє затримку виконання активного завдання, якщо в системі є незайнятий процесор.

При плануванні наборів DAG в багатопроцесорних системах перешкоди для кожного завдання DAG виникають у випадках коли:

- надходять зовнішні перешкоди від завдань з більш високим пріоритетом, в яких деякі або всі підзадачі можуть сприяти виникненню перешкод,
- присутнє внутрішнє втручання підзадач однієї і тієї ж групи DAG по відношенню один до одного.

Для паралельних завдань DAG алгоритм планування на рівні DAG означає, що рішення планування базуються на глобальних параметрах завдань DAG. Відповідно до цього розподіл пріоритетів здійснюється на задачі DAG, які потім застосовуються до їх відповідних підзадач. Аналіз планованості на рівні DAG залежить від глобальних параметрів DAG, таких як їх термін, період, загальний WCET та тривалість їх критичного шляху. Зазвичай результати тестів на планованість є песимістичними, і внутрішня структура DAGS не враховується в проведеному аналізі.

Отже, аналіз перешкод при плануванні на рівні DAG важко розрахувати, і ще важче визначити точні джерела перешкод. Однак, якщо алгоритм планування використовує додаткові знання щодо підзадач і потоків їх виконання, то аналіз перешкод може бути більш точним. У цьому випадку кажуть, що процес планування виконується на рівні підзадачі. Відповідно до цього, підзадачам будуть присвоєні пріоритети на основі алгоритму планування. Однак аналіз планованості вимагає додаткових часових параметрів для кожної підзадачі, відмінних від її WCET, що надаються моделлю DAG.

У випадку застосування методу додавання локальних параметрів часу до підзадач на основі їх залежностей та обмежень пріоритету між ними, проблема планування паралельних завдань DAG у багатопроцесорних системах буде спрощена до планування набору незалежних послідовних підзадач у багатопроцесорних системах, що широко вивчено в літературі.

Додавання двох часових параметрів, на додаток до параметра WCET (наданого моделлю), до кожної підзадачі в наборі DAG здійснюється для поліпшення аналізу перешкод при плануванні DAG у разі планування GEDF. Ці два параметри – це локальне зміщення та кінцевий термін виконання кожної підзадачі, отримують їх із внутрішньої структури завдання DAG та потоку виконання підзадач. Цей сценарій реалізується, коли набір DAG виконується на нескінченному числі процесорів, а всі його підзадачі виконуються паралельно максимально швидко, без затримок через перешкоди.

Локальне зміщення $O_{i,j}$ підзадачі $\tau_{i,j}$ визначається як мінімально можливий час активації підзадачі порівняно з терміном формування її завдання τ_i DAG.

Локальний термін виконання $D_{i,j}$ підзадачі $\tau_{i,j}$ – це максимальний час завершення виконання підзадачі $\tau_{i,j}$ такий, щоб у її наступників залишалось достатньо часу для виконання локальних крайніх термінів в межах реалізації загального завдання.

Для кожної підзадачі локальне зміщення та кінцевий термін обчислюються за допомогою простих алгоритмів пошуку глибини. Локальне зміщення підзадачі враховує час, необхідний для виконання попередніх підзадач. Відповідно, локальний термін виконання підзадачі залишає достатньо часу для виконання наступних підзадач.

Якщо підзадача $\tau_{i,j} \in \tau_i$ пропустить свій локальний термін $D_{i,j}$, то її задача DAG τ_i , безумовно, пропустить свій термін D_i .

Виходячи з визначення локального терміну, коли підзадача пропускає свій локальний термін, часу, що залишився до глобального терміну завдання DAG, в кращому випадку недостатньо для виконання наступних завдань. Таким чином, ранній збій у плануванні може бути оголошений на основі терміну виконання підзадачі замість того, щоб чекати пропуску терміну DAG.

Локальні зміщення та терміни виконання підзадач обчислюються на основі їх найкращого сценарію активації, в якому всі підзадачі виконуються відразу після їх звільнення без перешкод або затримок, ці параметри допомагають визначити найдовше вікно виконання кожної підзадачі. Однак активація підзадачі може бути відкладена через втручання підзадач з більш високим пріоритетом. Відповідно, остання можлива активація підзадачі відбувається, коли всі її попередники виконуються якомога пізніше (безпосередньо перед їх локальними термінами). Відповідно до цього,

активація підзадачі може відбутися в будь-який час протягом цього інтервалу, і це можна розглядати як максимальний джиттер випуску підзадачі.

Максимальний джиттер випуску $\hat{j}_{i,j}$ підзадачі $\tau_{i,j}$ визначається як різниця між самим раннім і самим пізнім часом випуску підзадачі щодо активації завдання DAG.

$$\hat{j}_{i,j} = \max_{\forall \tau_{i,k} \in \text{Parents}(\tau_{i,j})} (D_{i,k} - (O_{i,j} - O_{i,k}))$$

На основі визначення джиттеру випуску підзадачі всі її завдання звільняються в межах інтервалу джиттеру:

$$\forall J_{i,k}^j, j \in N, \tau_{i,k} \in \tau_i: r_{i,k}^j \in [O_{i,k}, O_{i,k} + \hat{j}_{i,j}]$$

На основі вищевикладеного видно, що розрахунок джиттеру вивільнення підзадач є песимістичним і завжди враховує, що попередні підзадачі виконуються якомога пізніше. Відповідно до цього, критичні підзадачі задачі DAG (підзадачі, що формують її критичний шлях) не матимуть часу на реалізацію, якщо вони активовані при максимальному джиттеру випуску.

Що стосується періоду підзадач (мінімальний час між надходженнями для спорадичних задач), то кожна підзадача успадковує період своєї задачі DAG, де $\forall \tau_{i,j} \in \tau_i, T_{i,j} = T_i$.

В результаті підзадачі даної задачі DAG тепер характеризуються локальним зміщенням, WCET, локальним кінцевим терміном і джиттером випуску підзадачі. Ці параметри дозволять обробляти підзадачі індивідуально і незалежно один від одного, щоб забезпечити аналіз планованості на рівні під задач та паралельність виконання.

Для процесу планування на рівні підзадач, що використовує будь-який алгоритм економії роботи, виконання підзадачі може бути заблоковано підзадачами з більш високим пріоритетом. Перешкода в підзадачі $\tau_{k,h} \in \tau_k$ визначається наступним чином:

$I_{k,h}(a, b)$ – це довжина всіх інтервалів, в яких підзадача $\tau_{k,h}$ готова до виконання, але заблокована підзадачами з вищим пріоритетом в інтервалі $[a, b)$.

$I^{i,j}_{k,h}(a, b)$ – це довжина всіх інтервалів, в яких підзадача $\tau_{k,h}$ готова до виконання, але заблокована підзадачею $\tau_{i,j}$, яка має вищий пріоритет в інтервалі $[a, b)$.

Оскільки підзадачі є однопотоковими послідовними задачами реального часу, співвідношення між $I_{k,h}(a, b)$ та $I^{i,j}_{k,h}(a, b)$ позначається наступним рівнянням:

$$I_{k,h}(a, b) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{\forall \tau_{i,j} \in \tau_i \in \tau} I^{i,j}_{k,h}(a, b)$$

Через характеристики задач DAG та обмеження пріоритету між підзадачами перешкоди в підзадачі $\tau_{k,h}$ поділяються на два джерела, зовнішні та внутрішні перешкоди. Нехай $Ie_{k,h}(a, b)$ позначають перешкоди від підзадач з більш високим пріоритетом завдань DAG, відмінних від τ_k в наборі, який визначається наступним чином:

$$Ie_{k,h}(a, b) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i \neq k, \forall \tau_{i,j} \in \tau_i} I^{i,j}_{k,h}(a, b)$$

Де деякі або всі підзадачі задачі τ_i ($i \neq k$) можуть впливати на $\tau_{k,h}$ залежно від їх пріоритетів.

Крім того, підзадачі τ_k можуть блокувати виконання $\tau_{k,h}$, що визначається як внутрішнє втручання $Ii_{k,h}(a, b)$. Оскільки розглядається задача з обмеженими термінами виконання, для неї кожна підзадача вносить свій внесок в перешкоди. Внутрішні перешкоди залежать від типу підзадач, які діляться на наступні категорії:

попередня підзадача $\tau_{k,x} \in pred(\tau_{k,h})$ підзадачі $\tau_{k,h}$: ця підзадача затримає активацію $\tau_{k,h}$, але як тільки підзадача $\tau_{k,x}$ завершить своє виконання, підзадача $\tau_{k,h}$ запуститься сама по собі, і подальшого ефекту $\tau_{k,x}$ не буде на $\tau_{k,h}$,

споріднена підзадача $\tau_{k,x} \in sibling(\tau_{k,h})$ – це підзадача, яка виконується паралельно без залежностей з підзадачею $\tau_{k,h}$. $sibling(\tau_{k,h})$ або споріднена задача $(\tau_{k,h})$ – це набір підзадач, які не є попередниками або наступниками підзадачі $\tau_{k,h}$,

наступна підзадача $\tau_{k,x} \in succ(\tau_{k,h})$ не впливає на підзадачу $\tau_{k,h}$, оскільки обидві підзадачі не можуть виконуватися паралельно, і підзадача $\tau_{k,x}$ починає своє виконання після того, як $\tau_{k,h}$ завершиться. Відповідно до цього, $I_{k,h}^{k,h}(a, b) = 0$,

підзадача $\tau_{k,h}$ сама по собі не впливає, оскільки розглядається завдання DAG з обмеженим терміном виконання, в якому в будь-який момент часу t активується тільки одне завдання кожного завдання DAG. Отже, $I_{k,h}^{k,h}(a, b) = 0$.

Виходячи з наведених вище визначень, внутрішня перешкода $I_{k,h}(a, b)$ для підзадачі $\tau_{k,h}$ в інтервалі $[a, b]$ визначається як:

$$I_{k,h}(a, b) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{\forall \tau_{k,i} \notin succ(\tau_{k,h}), i \neq h} I_{k,h}^{k,i}(a, b)$$

Нехай $J_{k,h}^*$ – завдання підзадачі $\tau_{k,h}$, яке має максимальну перешкоду, і нехай $I_{k,h}(r_{k,h}^*, d_{k,h}^*)$ позначають найгіршу перешкоду для підзадачі $J_{k,h}^*$ із $\tau_{k,h}$ в інтервалі $[r_{k,h}^*, d_{k,h}^*)$. Позначимо $I_{k,h}(r_{k,h}^*, d_{k,h}^*)$ як $\hat{I}_{k,h}$.

Лема 1. Набір задач τ , що складається зі спорадичних задач DAG з обмеженим терміном виконання, може плануватися на m ідентичних процесорах для будь-якого алгоритму збереження роботи, якщо:

$$\forall \tau_{k,h} \in \tau_k \in \tau$$

$$\hat{I}_{k,h} = \hat{I}_{e_{k,h}} + \hat{I}_{k,h} \leq (D_{k,h} - C_{k,h})$$

Доказ. Доказ цієї леми є прямолінійним. Перешкоди у виконанні підзадачі мають два основних джерела: внутрішній і зовнішній. Для того, щоб будь-яка підзадача могла бути запланована, часу її виконання (між її активацією та кінцевим терміном) має бути достатньо для її виконання плюс враховується робоче навантаження перешкод.

Висновки. У роботі проведено дослідження часових характеристик підзадач в багатопроекторних системах реального часу. Доведено, що на планування задач DAG у реальному часі впливає внутрішня структура DAG і потік виконання її підзадач. Запропоновано використання алгоритмів планування на рівні підзадач замість рівня DAG. Це означає, що рішення щодо планування базуються на локальних параметрах підзадач замість глобальних параметрів DAG. Головною умовою успішного планування паралельного виконання підзадач є формування низки додаткових локальних параметрів, таких як локальне зміщення, крайній термін і джиттер випуску для кожної підзадачі. Проведено аналіз перешкод і робочого навантаження для алгоритму планування.

Перспективами подальшого дослідження є аналіз показників продуктивності, таких як коефіцієнт прискорення та коефіцієнт наближення. У сукупності ці показники є показниками ефективності планування.

Список бібліографічного опису

1. Зайцев В. Г., Цибаєв Є.І. Оцінка часових характеристик задач в багатопроекторних системах реального часу з використанням сіток Петрі. Управління розвитком складних систем. 2020. № 42. С. 43–50; dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.43-50.
2. Косолап, А., Волинець, Н. (2018). Оптимальний розподіл ресурсів у багатопроекторних системах. Математичне моделювання. № 2(39). С. 89–94. DOI: 10.31319/2519-8106.2(39)2018.154226.
3. Василюк А. Басюк Т. Алгебри алгоритмів для моделювання розподілу ресурсів в ІТ проєктах. *Information Systems And Networks*, 2023. С. 156-166. <https://doi.org/10.23939/>

4. Клушин Ю. С. Оцінювання надійності паралельних обчислювальних систем під час виконання заданого комплексу взаємопов'язаних робіт. Комп'ютерні системи і мережі, 2019. Т. 1, № 1. С. 15-23.
5. Qamhieh Manar, George Laurent, Midonnet Serge. Stretching algorithm for global scheduling of real-time DAG tasks. Real-Time Systems. 2019. №55. <https://doi.org/10.1007/s11241-018-9311-1>.
6. Kuo Chin-Fu, Lin Jian-Xing, Lu Yung-Feng. Energy-efficient scheduling algorithm for real-time tasks with multiple parallel segments in multiprocessor systems. RACS '19: Proceedings of the Conference on Research in Adaptive and Convergent Systems. 2019. P.14-19. <https://doi.org/10.1145/3338840.3355649>.
7. Dong Zheng, Liu Cong. New Analysis Techniques for Supporting Hard Real-Time Sporadic DAG Task Systems on Multiprocessors. 2018.
8. Ghavidel Abolfazl. Safety Verification of Rate-Monotonic Least-Splitting Real-Time Scheduler on Multiprocessor System. Journal of Computer and Knowledge Engineering. 2016. №1. <https://doi.org/10.22067/cke.v1i2.58792>.
9. Kuo Chin-Fu, Lu Yung-Feng, Chen Tzu-Chieh. Scheduling Algorithm for Tasks with Multiple Parallelization Options on Multiprocessor Systems. 2016. P. 175-180. <https://doi.org/10.1145/2987386.2987390>.
10. Sun Zhenyu, Guo Mengying, Liu Xingwu. A Survey of Real-Time Scheduling on Multiprocessor Systems. 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7443-3_7.
11. Teixeira Ricardo, Lima George. Shared resources in multiprocessor real-time systems scheduled by RUN. Real-Time Systems. 2022. № 58. <https://doi.org/10.1007/s11241-021-09374-3>.
12. Ismail Habibah, Jawawi Dayang, Ahmedy Ismail. A Hybrid Real-Time Scheduling Mechanism Based on Multiprocessor for Real-Time Tasks in Weakly Hard Specification. 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10461-9_15.
13. Baruah Sanjoy, Bertogna Marko, Buttazzo Giorgio. Multiprocessor Scheduling for Real-Time Systems. 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08696-5>.
14. Kumar Ajitesh. A Systematic Survey of Multiprocessor Real-Time Scheduling and Synchronization Protocol. International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control. 2022. № 12. <https://doi.org/10.2174/2210327912666220105141851>.

References

1. Zaitsev V. G., Tsybaev E. I. Estimation of time characteristics of tasks in multiprocessor real-time systems using Petri nets. Management of the development of complex systems. 2020. № 42. P. 43-50; <dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.43-50>.
2. Kosolap, A., Volynets, N. (2018). Optimal resource allocation in multiprocessor systems. Mathematical modeling. № 2(39). С. 89-94. DOI: 10.31319/2519-8106.2(39)2018.154226.
3. Algebraic algorithms for modeling resource allocation in IT projects. Information Systems And Networks, 2023. С. 156-166. <https://doi.org/10.23939/>.
4. Estimating the reliability of parallel computer systems during the execution of a given set of interrelated works. Computer systems and networks, 2019. Т. 1, № 1. С. 15-23.
5. Qamhieh Manar, George Laurent, Midonnet Serge. Stretching algorithm for global scheduling of real-time DAG tasks. Real-Time Systems. 2019. №55. <https://doi.org/10.1007/s11241-018-9311-1>.
6. Kuo Chin-Fu, Lin Jian-Xing, Lu Yung-Feng. Energy-efficient scheduling algorithm for real-time tasks with multiple parallel segments in multiprocessor systems. RACS '19: Proceedings of the Conference on Research in Adaptive and Convergent Systems. 2019. P.14-19. <https://doi.org/10.1145/3338840.3355649>.
7. Dong Zheng, Liu Cong. New Analysis Techniques for Supporting Hard Real-Time Sporadic DAG Task Systems on Multiprocessors. 2018.
8. Ghavidel Abolfazl. Safety Verification of Rate-Monotonic Least-Splitting Real-Time Scheduler on Multiprocessor System. Journal of Computer and Knowledge Engineering. 2016. №1. <https://doi.org/10.22067/cke.v1i2.58792>.

9. Kuo Chin-Fu, Lu Yung-Feng, Chen Tzu-Chieh. Scheduling Algorithm for Tasks with Multiple Parallelization Options on Multiprocessor Systems. 2016. P. 175-180. <https://doi.org/10.1145/2987386.2987390>.
10. Sun Zhenyu, Guo Mengying, Liu Xingwu. A Survey of Real-Time Scheduling on Multiprocessor Systems. 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7443-3_7.
11. Teixeira Ricardo, Lima George. Shared resources in multiprocessor real-time systems scheduled by RUN. Real-Time Systems. 2022. № 58. <https://doi.org/10.1007/s11241-021-09374-3>.
12. Ismail Habibah, Jawawi Dayang, Ahmedy Ismail. A Hybrid Real-Time Scheduling Mechanism Based on Multiprocessor for Real-Time Tasks in Weakly Hard Specification. 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10461-9_15.
13. Baruah Sanjoy, Bertogna Marko, Buttazzo Giorgio. Multiprocessor Scheduling for Real-Time Systems. 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08696-5>.
14. Kumar Ajitesh. A Systematic Survey of Multiprocessor Real-Time Scheduling and Synchronization Protocol. International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control. 2022. № 12. <https://doi.org/10.2174/2210327912666220105141851>.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-15>

УДК 004.08

Ярошенко Олександр Сергійович, магістр, аспірант,

<https://orcid.org/0000-0003-1871-3810>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м.Київ, Україна

МЕТОД АНАЛІЗУ ЕМОЦІЙНОГО ЗАБАРВЛЕННЯ ТЕКСТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ГРАФОВИХ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Ярошенко О.С. Метод аналізу емоційного забарвлення текстів за допомогою графових згорткових нейронних мереж. У роботі досліджено графові згорткові нейронні мережі, як перспективний напрямок аналізу емоційного забарвлення текстів. Детально описано конструкції емоцій, їх природу та сутність. Зазначено основні способи класифікації емоцій такі як бінарна класифікація емоцій, класифікація емоцій з кількома мітками та багатокласова класифікація емоцій. Окреслено принцип формування нейронних мереж графів та наголошено, що моделі побудовані на графових нейронних мережах зазвичай не враховують семантичне значення тексту, що стосується значення, визначеного відношеннями між словами в реченні, що є важливим для класифікації емоцій тексту, що аналізується. Відокремлено поняття семантичного та синтаксичного аналізу тексту, описано підходи до реалізації. Наголошено, що семантичне представлення відображає зміст тексту в досить структурованій формі з виділенням різних представлень: представлення абстрактного значення, універсальна концептуальна когнітивна анотація, дволексичні семантичні залежності та універсальна декомпозиційна семантика. Зазначається, що модель синтаксичного аналізатора являє собою семантичний аналізатор на основі графів, який вирішує проблему синтаксичного аналізу конститuentів. Охарактеризовано рівні моделі та наведено принцип роботи. Математично представлено ациклічний орієнтовний граф системи аналізу емоційного забарвлення тексту, описано матрицю ознак та матрицю суміжності. Наведено модель нейронної мережі, яка працює з графоструктурованими даними, яка складається з трьох основних шарів. Запропоновано підхід до навчання такої нейронної мережі. Наголошено, що модель використовує конкатенацію вбудованих слів і синтаксичних вбудованих елементів у якості вхідних даних. Як результат отримано згорткову нейронну мережу для аналізу емоційного забарвлення текстів та проаналізовано її характеристики порівняно з іншими типами нейронних мереж. Зроблено висновок, що хоча й точність розробленого методу є досить високою, інші архітектури нейронних мереж краще підходять для задачі сентимент аналізу.

Ключові слова: згорткова нейронна мережа, емоція, граф, текст, аналіз, побудова, категорія.

Yaroshenko O. Method of analysis of emotional coloring of texts using graph convolutional neural networks. In the work, graph convolutional neural networks were investigated as a promising direction for the analysis of the emotional coloring of texts. The constructions of emotions, their nature and essence are described in detail. The main methods of classification of emotions are indicated, such as binary classification of emotions, classification of emotions with several labels and multi-class classification of emotions. The principle of forming graph neural networks is outlined and it is emphasized that models built on graph neural networks usually do not take into account the semantic meaning of the text, which refers to the meaning determined by the relations between words in the sentence, which is important for the classification of the emotions of the analyzed text. The concept of semantic and syntactic analysis of the text is separated, the approaches to implementation are described. It is emphasized that the semantic representation reflects the content of the text in a fairly structured form with the selection of different representations: abstract meaning representation, universal conceptual cognitive annotation, bilexical semantic dependencies and universal decomposition semantics. It is noted that the parser model is a graph-based semantic parser that solves the problem of constituent parsing. The model levels are characterized and the principle of operation is given. Mathematically, an acyclic indicative graph of the system of emotional coloring of the text is presented, the feature matrix and the adjacency matrix are described. A model of a neural network that works with graph-structured data is presented, which consists of three main layers. An approach to training such a neural network is proposed. It is emphasized that the model uses the concatenation of embedded words and syntactic embedded elements as input data. As a result, a convolutional neural network was obtained for the analysis of emotional coloring of texts and its characteristics compared to other types of neural networks were analyzed. It was concluded that although the accuracy of the developed method is quite high, other architectures of neural networks are better suited for the task of sentiment analysis.

Key words: convolutional neural network, emotion, graph, text, analysis, construction, category.

Вступ та постановка проблеми. У сучасній науковій літературі емоції відзначаються як вроджені конструкції, які зазвичай виникають під час спілкування та допомагають у міжособистісній взаємодії, яка є значною частиною повсякденного життя. Емоції фундаментально впливають на життя людини, певні рішення, психічне та фізичне здоров'я. У природі зустрічають як позитивні так і негативні емоції, позитивні емоції більшою мірою пов'язані з покращенням здоров'я людини та ефективністю роботи, тоді як негативні емоції можуть викликати проблеми зі здоров'ям. Емоції можна розглядати з двох ширших точок зору: неврологічної та людських переживань.

Сучасна людина схильна виражати свої емоції різними каналами. Зокрема, це соціальні медіа, які є популярною платформою, де люди виражають свої емоції в різних формах, таких як текст, зображення, аудіо чи відео. Це дослідження базується на класифікації текстових емоцій, де

мета класифікації емоцій, розширеної сфери аналізу настроїв, полягає в тому, щоб призначити можливі емоції фрагменту тексту, який найбільш точно відображає психічний стан автора.

Існує три способи вирішення проблеми класифікації емоцій: бінарна класифікація емоцій визначає, чи присутня емоція чи ні [1], багатокласова класифікація емоцій класифікує екземпляр до одного з попередньо визначених наборів даних [2], класифікація емоцій з кількома мітками – класифікує випадок як «нейтральний або без емоцій» або одну і більше з набору попередньо визначених міток, які найкраще представляють психічний стан автора [3]. Розробка моделей класифікації емоцій має вирішальне значення, враховуючи їх широкий вплив і повсюдність. Існують численні програми для моделей категоризації емоцій у різних областях людської діяльності, тому класифікація емоцій у тексті є завданням обробки природної мови (NLP).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формулювання наукової думки у сфері аналізу емоційного забарвлення текстів є різномірним та масштабним. У сучасній науковій площині з'являються роботи присвячені дослідженням штучних нейронних мереж та алгоритмів їх реалізації у зазначеній сфері.

В останні роки, моделі глибокого навчання в завданнях NLP, таких як нейронний машинний переклад (NMT) [4] та семантична текстова подібність (STS) [5] використовуються багатьма вченими.

Так, А. Концевой і О. Бісікало [6] провели огляд найбільш поширених моделей класифікації текстів на основі глибокого навчання, розроблених за останні роки, та проаналізували їхній технічний внесок, схожість та сильні сторони.

Н. М. Холодна та В. А. Висоцький [7] розробили модель машинного навчання для корекції помилок в україномовних текстах. Авторами запропоновано універсальну схему розробки системи корекції помилок для різних мов. Відповідно до отриманих результатів, нейронна мережа має здатність виправляти прості речення, написані українською, однак розроблення повноцінної системи вимагатиме застосування перевірки орфографії за допомогою словників і перевірки правил, як простих, так і заснованих на результаті парсингу залежностей або інших ознак. Науковці довели, що з-поміж трьох моделей, найкращі показники має попередньо навчена модель нейронного перекладу mT5. З метою економії обчислювальних ресурсів можливим також є застосування попередньо навченої нейронної мережі типу BERT, використовуючи її як у якості енкодера, так і декодера. Така нейронна мережа має вдвічі менше параметрів, ніж інші попередньо навчені моделі машинного перекладу, і показує задовільні результати при виправленні граматичних та стилістичних помилок.

У [5] розроблено комплексний метод по автоматичному розпізнаванню природної мови та емоційного стану. Прототип і вирішення реальної бізнес задачі з виявлення емоцій демонструють можливості і обмеження систем розпізнавання мови та емоційних станів. З використанням запропонованих методів псевдо-лейбування вдається без значних інвестицій в обчислювальні ресурси отримати точність розпізнавання близьку до лідерів ринку а для мов з незначною кількістю відкритих даних навіть перевершити.

О. І. Голубенко та О. О. Підмогильний [8] описали тип штучного інтелекту (AI), який використовує алгоритми машинного навчання для створення тексту природною мовою. Розкрили принципи роботи, недоліки та переваги, запропонували схему реалізації.

Із зарубіжних авторів варто відмітити роботи таких науковців як: Фан А., Бхосале С., Швенк Х., Ма З., Ель-Кішки А., Гоял С., Бейнс М., Челебі О., Вензек Р., Чаудхарі Ст., Гоял Н., Берч Т., Липчинський Ст, Едунов С., Граве Е., Аулі М., Жоулін А. [9], Хао С., Хао Г. [10], Йосипів І. [11], Батюк Т. М., Висоцька Ст. [12], Ю. Сунь, С. Ван, Ю.-К. Лі, С. Фен, Х. Тянь, Х. Ву і Х. Ван [13], Сунь С., Ге Т., Ма С., Лі Дж., Вей Ф. та Ван Х. А. [14], Лех, М. [15], Тан Ю., Чан К., Лі Сянь, Чен П.-Дж., Гоял Н., Чаудхарі Ст, Гу Дж., Фань А. [16], Роте С., Маллінсон Дж., Мальмі Е., Краузе С., Северін А. [17], Йосипів І. [18], Ван З., Ван Х. [19], Ван Х., Чжун Ст [20], Роте С., Нараян С., Северін А. [21], та інших.

Однак незважаючи на масштабність наукових досліджень питання актуальності даної роботи не викликає сумнівів.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає в розробці нового методу аналізу сентименту в тексті на основі графових згорткових нейронних мереж, та оцінці його як перспективного напрямку аналізу емоційного забарвлення текстів.

Викладення основного матеріалу дослідження. З домінуванням моделей глибокого навчання в задачах NLP, таких як аналіз настроїв, відповіді на запитання та машинний переклад,

широко використовувані моделі глибокого навчання також застосовуються для класифікації з кількома мітками, включаючи згорткові нейронні мережі (CNN), мережі довготривалої короткочасної пам'яті, двонаправлені мережі довготривалої пам'яті, керовані рекурентні блоки (GRU) [22].

Нейронні мережі графів – це клас методів глибокого навчання, призначених для формування висновків щодо даних, описаних графами, які широко використовуються в різних завданнях NLP, таких як аналіз залежностей та класифікація тексту. Моделі зазвичай не враховують семантичне значення тексту, що стосується значення, визначеного відношеннями між словами в реченні, що є важливим для класифікації емоцій тексту, що аналізується.

Семантичне представлення відображає зміст тексту в досить структурованій формі (наприклад, представлення на основі графів або дерева). Останніми роками представлення на основі графів привернули увагу дослідників завдяки їхній здатності виражати та генерувати адекватні цільові структури, особливо для синтаксичного аналізу та семантичного представлення тексту на рівні речень. Зростаюча популярність семантичних представлень на основі графів призвела до пропозиції різноманітних структур семантичного представлення, таких як представлення абстрактного значення, універсальна концептуальна когнітивна анотація, дволексичні семантичні залежності та універсальна декомпозиційна семантика. Ці представлення на основі графів виявилися корисними для завдань розуміння природної мови (NLU) і вже продемонстрували свою застосовність у різноманітних завданнях NLP, таких як резюмування тексту, виявлення перефразування, машинний переклад, відповіді на запитання та спрощення тексту.

Семантичне представлення являє собою спосіб вираження сенсу тексту, який машина може обробити для виконання конкретного завдання NLP, що вимагає розуміння сенсу. Семантичне представлення вирішує проблеми класифікації з кількома мітками на основі графів із багаторівневою структурою, де кожен рівень відповідає «модулю» семантичного розрізнення [23]. Основний рівень системи аналізу емоційного забарвлення тексту представлено спрямованим ациклічним графом (DAG), де вузли представляють термінальні (слова) і не термінальні лексеми, а ребра представляють семантичні ролі між вузлами. У представленні існує 4 різні категорії семантичних ролей:

1) Елементи сцени: Основним елементом репрезентації системи є сцена і процес (P), стан (S), учасник (A) і прислівник (D) є елементами сцени. Процес (P) і стан (S) є основними відносинами сцени, які визначають тип сцени. Якщо є дія або рух, основним відношенням є процес (P). Однак, якщо це тимчасово стійкий стан, відношення є станом (S). Учасник (A) є учасником основного відношення, і в сцені може бути один або більше учасників. Останній елемент прислівник (D) детально описує основне відношення, наприклад, час або місце.

2) Не сценарні елементи: Є також елементи системи аналізу емоційного забарвлення тексту, які не викликають сцени. Елементи: центр (C), розробник (E), з'єднувач (N) і представник (R), де центр (C) і розробник (E) концептуалізують одиницю, що не є сценою, а також діють як дескриптори класу. З'єднувач (N) з'єднує дві або більше сутностей зі схожими ролями, наприклад, розробник або центр. Нарешті, представник (R) пов'язує одну або більше сутностей з основною сценою.

3) Відносини між сценами: Системи аналізу емоційного забарвлення тексту може містити більше однієї сцени, що називається паралельною сценою (H). Зв'язок (L) – це зв'язок між сценами, який з'єднує паралельні сцени. Основа (G) – це сутність, яка відноситься до мовленнєвої події того хто говорить, слухача, в якому текст був вимовлений/написаний/задуманий.

4) Інше: функція (F) – це елемент, який функціонує як допоміжний елемент більшої конструкції.

Модель синтаксичного аналізатора являє собою семантичний аналізатор на основі графів, який вирішує проблему синтаксичного аналізу конститuentів. Він містить кодер і декодер, де кодер є механізмом самоуважності з 2 класифікаторами багатопшарового перцептрона з 2 повнозв'язаними рівнями та нелінійною функцією активації у якості вихідного рівня. Вихідний рівень генерує оцінки, де діапазони відповідають складовим у дереві. Частиною декодера є алгоритм СУК (Socke-YoungerKasami) [10], який генерує дерево складових із максимальним балом, використовуючи бали, згенеровані на вихідному рівні кодера. Модель перетворює дерева конститuentів у представлення системи аналізу емоційного забарвлення тексту, використовуючи один із рівнів MLP для прогнозування віддалених країв представлення.

2) Розбір залежностей

Грамматика залежностей – це підхід до синтаксису природних мов. Залежність – це поняття мовних одиниць, які є словами, пов'язаними між собою спрямованими зв'язками. Щоб отримати синтаксичне представлення наборів даних для аналізу емоційного забарвлення тексту пропонується використовувати синтаксичний аналізатор глибокої біафінної нейронної залежності запропонований Дозатом і Меннінгом [18]. Модель аналізатора відповідає моделі Bi-LSTM з біафінними класифікаторами для прогнозування дуг і міток.

Математичне представлення ациклічного орієнтовного графу системи аналізу емоційного забарвлення тексту:

$$G = (V, E)$$

де V – набір вузлів в представленні системи аналізу емоційного забарвлення тексту;

E – набір ребер, які є семантичними ролями системи аналізу емоційного забарвлення тексту.

Матриця ознак:

$$X(n \times k)$$

де n – кількість вузлів (кінцевих і не термінальних) у графі;

k – розмірність вбудовування.

Матриця суміжності

$$A(n \times n)$$

де n – кількість вузлів у графі.

Для матриці ознак попередньо навчені вбудовування слів використовуються для кінцевих вузлів, а випадково згенероване вбудовування з тим самим розміром попередньо навченого вбудовування використовується для не термінальних вузлів. Аналогічна процедура застосовується до дерев залежностей, отриманих із аналізатора залежностей.

Модель нейронної мережі, яка працює з графоструктурованими даними використовує замасковані шари самоуважності, щоб усунути обмеження попередніх методів, заснованих на згортках, додаючи увагу кожному сусідові. Модель складається з трьох рівнів:

- вхідного рівня;
- рівня самоуважності;
- вихідного рівня.

Архітектура запропонованої моделі представлена на рисунку 1.

Вхідний рівень: вхідний рівень моделі розроблений як матриця суміжності та ознак, яка генерується з будь-якого семантичного представлення дерева залежностей;

Рівень самоуважності: обчислюється як:

$$H^{i+1} = \sigma(A \cdot H^i \cdot W^i)$$

де W^i – вагова матриця для шару i ;

A – матриця суміжності;

H^i – матриця ознак першого шару ($H^0 = X$);

де X – матриця ознак (витягнута на етапі попередньої обробки);

σ – функція нелінійної активації.

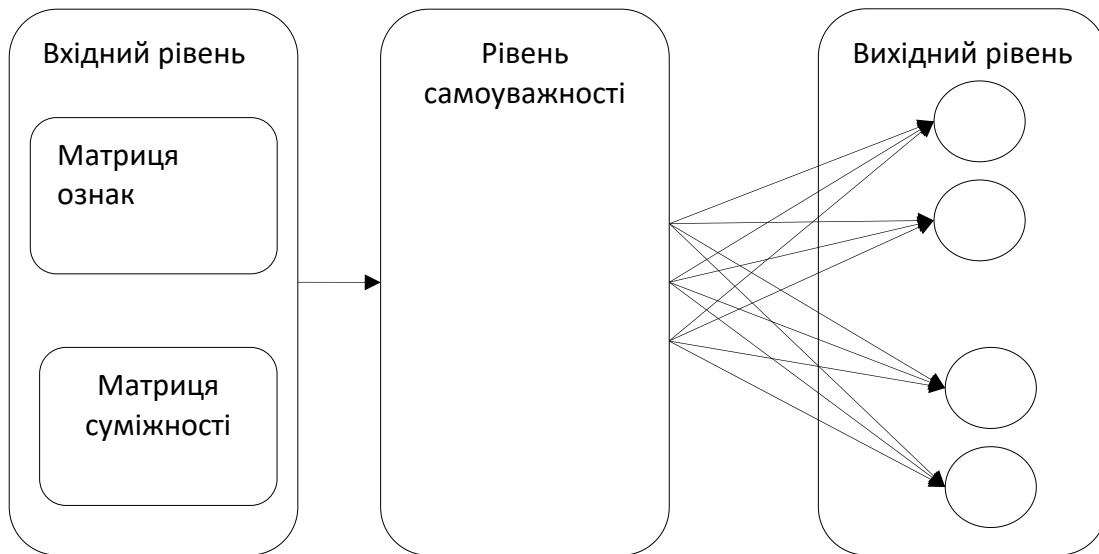


Рисунок 1 – Архітектура нейронної мережі, яка працює з графоструктурованими даними

У моделі нейронної мережі, яка працює з графоструктурованими даними застосовано багатошаровий GAT, де розмір шару є гіперпараметром, який потрібно налаштувати на графі.

Вихідний рівень: вихідним рівнем є сигмоїдний шар із m класів, де m – кількість емоцій у наборі даних. Сигмоїдний шар стискає результати між 0 і 1.

$$Z = \text{sigmoid}(H^l)$$

де H^l – матриця ознак кінцевого рівня графа.

Навчання зовнішнього аналізатора відбувається за допомогою комбінації всіх навчальних наборів даних. Модель використовує конкатенацію вбудованих слів і синтаксичних вбудованих елементів у якості вхідних даних.

На основі даних вище, була побудована модель нейронної мережі, яка складається з наступного набору шарів: 2 згорткових шари GCNConv, що використовується в цих мережах для розповсюдження інформації та виділення ознак із даних графа, шару GATConv, що вирішує проблему вивчення представлень вузлів у графі за допомогою механізмів уваги та шару Dropout для пониження ймовірності перетренування мережі (був доданий в ході експериментів), згорткового шару Conv2D та шару з функцією активації $\log_softmax$ на виході. В якості оптимізатора використовувався Adam. У якості бенчмарку для порівняння характеристик моделі було обрано модель FastText, адже вона показує досить високі результати для задачі сентимент аналізу без потреби в точному налаштуванні гіперпараметрів. Для обробки тексту використовувався TF-IDF векторизатор та модуль `sklearn.metrics.pairwise` для побудови матриці суміжності методом `cosine_similarity`. В результаті запуску моделі на датасеті з відгуками[24] маємо наступні результати:

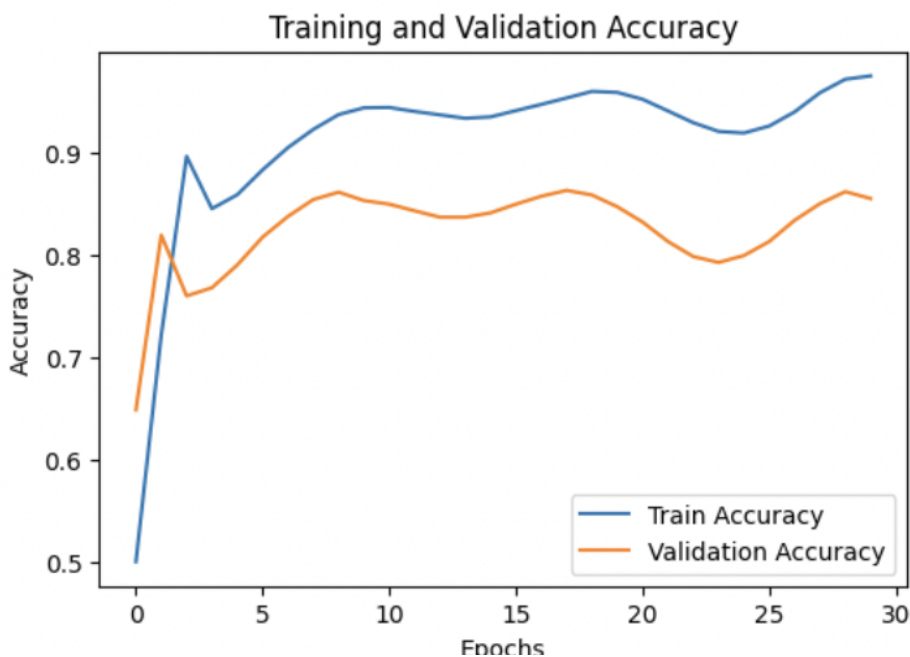


Рисунок 2 – Графік точності нейронної мережі в залежності від кількості епох

Графік точності нейронної мережі (рис. 2) може іти хвилями або демонструвати різкі коливання з ростом епох навчання з кількох причин, таких як overfitting та невірний вибір гіперпараметрів. Скорегуємо ці фактори за допомогою додавання шару Dropout та тюнінгу гіперпараметрів моделі.

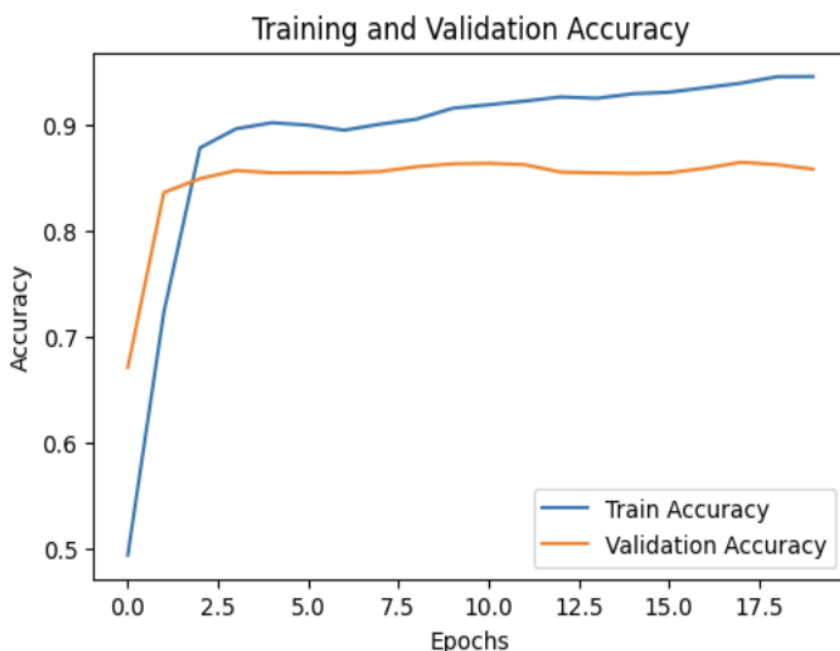


Рисунок 3 – Графік точності нейронної мережі в залежності від кількості епох тренування та наявності Dropout шару

В якості експерименту, було запущено навчання моделей GAT_GC_N, GAT_GC_N_Dropout та GAT_GC_N_Dropout на трьох датасетах з відгуками: Amazon Product Reviews [24], Twitter PC Games[25], Flipkart Product Reviews[26]

Модель	Набір даних	Точність	F-1 Positive	F-1 Negative
GAT_GC_N	Amazon Product Reviews	84.82%	0.85	0.85

GAT_GCN_Dropout	Amazon Product Reviews	86.48%	0.86	0.86
FastText	Amazon Product Reviews	89.18%	0.89	0.89
GAT_GCN	Twitter PC Games Reviews	85.70	0.85	0.86
GAT_GCN_Dropout	Twitter PC Games Reviews	87.20%	0.87	0.87
FastText	Twitter PC Games Reviews	90.5%	0.90	0.90
GAT_GCN	Flipkart Product Reviews	86.48%	0.87	0.86
GAT_GC_Dropout	Flipkart Product Reviews	86.98%	0.88	0.86
FastText	Flipkart Product Reviews	88.58%	0.89	0.88

Таблиця 1 – Результати експерименту з використанням нового методу

Як видно з результатів запуску, точність розробленого методу є відносно високою, хоча й не перевищує результати обраного бенчмарку. Тобто, розроблений метод можна розглядати як альтернативу іншим підходам при аналізі настроювання. Також варто розглянути можливість подальшої настройки моделі GAT_GCN та збільшення обсягу тренувальних даних для покращення її результатів. Але з даних експерименту можна зробити висновок, що хоча й новий метод з використанням графових згорткових мереж для аналізу настроювання має високу точність, інші моделі, такі як FastText - краще підходять для поставленої задачі.

Висновки. У роботі досліджено графову згорткову нейронну мережу для аналізу емоційного забарвлення текстів. Враховуючи, що в останні роки семантично та синтаксично обізнані моделі набули популярності завдяки їхній вражаючій ефективності в проблемах обробки природної мови. Варто наголосити, що ці моделі не досліджувалися для проблеми аналізу емоційного забарвлення текстів за кількома мітками. У роботі описано процес аналізу та розроблено модель семантично та синтаксично обізнаної мережі графів для аналізу емоційного забарвлення текстів. Запропонована модель може бути застосована на складних наборах текстів за умови її попереднього перенавчання враховуючи напрямок вхідних даних. З результатів експериментів слідує, що дана модель може бути альтернативою для аналізу настроювання, проте є інші рішення, які можуть більш точно визначати ставлення в текстах.

Перспективами подальших досліджень є розробка моделей з використанням інших архітектур і таких, що будуть враховувати декілька міток даних всередині тексту, що дозволить підвищити точність аналізу.

Список бібліографічного опису

- 1.Вершков О.О., Антонова Г.В. Психологічна модель, що оперує формальними позначеннями емоційних станів. Удосконалення освітньо-виховного процесу в закладі вищої освіти: збірник науково-методичних праць / Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. Вип. 26. С. 26-30.
- 2.Ювченко К. С. Система розпізнавання емоцій людини з використанням алгоритмів глибокого навчання / К. С. Ювченко // Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті : тези доповідей 27-го Міжнародного молодіжного форуму, 10–12 травня 2023 р. – Харків : ХНУРЕ, 2023. Т. 7. С. 235-236.
- 3.Лосіфов Є. А. Комплексний метод по автоматичному розпізнаванню природної мови та емоційного стану. Кібербезпека: освіта, наука, техніка, 2023. № 3 (19). С. 146-164.
- 4.Шевченко О., Огурцова О. Основні принципи та обмеження нейронного машинного перекладу. Актуальні питання іноземної філології. 2022. С. 215-218. DOI: <https://doi.org/10.32782/2410-0927-2022-16-31>.
- 5.Zhou, Ya & Li, Cheng & Huang, Guimin & Guo, Qingkai & Li, Hui & Wei, Xiong. (2023). A Short-Text Similarity Model Combining Semantic and Syntactic Information. Electronics. 12. 3126. 10.3390/electronics12143126.

6. Концевой А., Бісікало О. Модели глубокого навчання для вирішення задачі класифікації текстової інформації. ІТКІ, 2022. вип. 55, вип. 3. С. 13–20. DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-55-3-13-20>
7. Холодна Н. М., В. А. Висоцька Технологія виправлення граматичних помилок в україномовному текстовому контенті на основі методів машинного навчання. Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2023. № 1. С. 114–140. DOI 10.15588/1607-3274-2023-1-12
8. Голубенко О. І., Підмогильний О. О. Generative Pre-training Transformer. Науковий журнал «ІТ SYNERGY», 2022. випуск 2 (3). С. 19–27. DOI: <https://doi.org/10.53920/ITS-2022-2-2>
9. Fan A., Bhosale S., Schwenk H., Ma Z., El-Kishky A., Goyal S., Baines M., Celebi O., Wenzek G., Chaudhary V., Goyal N., Birch T., Liptchinsky V., Edunov S., Grave E., Auli M., Joulin A. Beyond English-Centric Multilingual Machine Translation, ArXiv, 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2010.11125
10. Hao S., Hao G. A Research on Online Grammar Checker System Based on Neural Network Model, Journal of Physics, 2020, Vol. 1651, pp. 1–8. DOI: 10.1088/1742- 6596/1651/1/012135
11. Iosifov, I., et al. (2022). Transferability Evaluation of Speech Emotion Recognition Between Different Languages. In Advances in Computer Science for Engineering and Education (pp. 413–426). https://doi.org/10.1007/978-3-031-04812-8_35
12. Batiuk T. M., Vysotska V. Technology for Personalities Socialization by Common Interests Based on Machine Learning Methods And SEO-Technologies, Radio Electronics, Computer Science, Control, 2022, Vol. 2 (61), pp. 53–68. DOI: 10.15588/1607-3274-2022-2-6
13. Y. Sun, S. Wang, Y.-K. Li, S. Feng, H. Tian, H. Wu, and H. Wang, “Ernie 2.0: A continual pre-training framework for language understanding.” in AAAI, 2020.
14. Sun X., Ge T., Ma S., Li J., Wei F., and Wang H. A Unified Strategy for Multilingual Grammatical Error Correction with Pre-trained Cross-Lingual Language Model, ArXiv, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2201.10707
15. Lech, M., et al. (2020). Real-Time Speech Emotion Recognition Using a Pre-trained Image Classification Network: Effects of Bandwidth Reduction and Companding. Frontiers in Computer Science, 2. <https://doi.org/10.3389/fcomp.2020.00014>
16. Tang Y., Tran C., Li Xian, Chen P.-J., Goyal N., Chaudhary V., Gu J., Fan A. Multilingual Translation with Extensible Multilingual Pretraining and Finetuning, ArXiv, 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2008.00401
17. Rothe S., Mallinson J., Malmi E., Krause S., Severyn A. A Simple Recipe for Multilingual Grammatical Error Correction, ArXiv, 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2106.03830
18. Iosifov, I., et al. (2022). Natural Language Technology to Ensure the Safety of Speech Information. In Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II (pp. 216–226).
19. Wan Z., Wan X. A Syntax-Guided Grammatical Error Correction Model with Dependency Tree Correction, ArXiv, 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2111.03294
20. Wang X., Zhong W. Research and Implementation of English Grammar Check and Error Correction Based on Deep Learning, Scientific Programming, 2022, Vol. 2022, Article ID 4082082. DOI: 10.1155/2022/4082082
21. Rothe S., Narayan S., Severyn A. Leveraging Pre-trained Checkpoints for Sequence Generation Tasks, ArXiv, 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1907.12461.
22. Zhou W., Ge T., Mu C., Xu K., Wei F., Zhou M. Improving Grammatical Error Correction with Machine Translation Pairs, ArXiv, 2020. DOI: 10.48550/arXiv.1911.02825
23. Xue L., Constant N., Roberts A., Kale M., Al-Rfou R., Siddhant A., Barua A., Raffel C. mT5: A Massively Multilingual Pre-trained Text-to-Text Transformer, Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Online, Jun. 2021 : proceedings, pp. 483–498. DOI: 10.18653/v1/2021.naacl-main.41.
24. Amazon Product Reviews. *Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community*. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/arhamrumi/amazon-product-reviews> (date of access: 11.09.2023).
25. Twitter Sentiment Analysis. *Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community*. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/jp797498e/twitter-entity-sentiment-analysis> (date of access: 11.09.2023).
26. Flipkart Product reviews with sentiment Dataset. *Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community*. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/niraliivaghani/flipkart-product-customer-reviews-dataset> (date of access: 11.09.2023).

References

1. Fan A., Bhosale S., Schwenk H., Ma Z., El-Kishky A., Goyal S., Baines M., Celebi O., Wenzek G., Chaudhary V., Goyal N., Birch T., Liptchinsky V., Edunov S., Grave E., Auli M., Joulin A. Beyond English-Centric Multilingual Machine Translation, ArXiv, 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2010.11125
2. Hao S., Hao G. A Research on Online Grammar Checker System Based on Neural Network Model, Journal of Physics, 2020, Vol. 1651, pp. 1–8. DOI: 10.1088/1742- 6596/1651/1/012135
3. Iosifov, I., et al. (2022). Transferability Evaluation of Speech Emotion Recognition Between Different Languages. In Advances in Computer Science for Engineering and Education (pp. 413–426). https://doi.org/10.1007/978-3-031-04812-8_35
4. Batiuk T. M., Vysotska V. Technology for Personalities Socialization by Common Interests Based on Machine Learning Methods And SEO-Technologies, Radio Electronics, Computer Science, Control, 2022, Vol. 2 (61), pp. 53–68. DOI: 10.15588/1607-3274-2022-2-6
5. Y. Sun, S. Wang, Y.-K. Li, S. Feng, H. Tian, H. Wu, and H. Wang, “Ernie 2.0: A continual pre-training framework for language understanding.” in AAAI, 2020.
6. Sun X., Ge T., Ma S., Li J., Wei F., and Wang H. A Unified Strategy for Multilingual Grammatical Error Correction with Pre-trained Cross-Lingual Language Model, ArXiv, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2201.10707

7. Lech, M., et al. (2020). Real-Time Speech Emotion Recognition Using a Pre-trained Image Classification Network: Effects of Bandwidth Reduction and Companding. *Frontiers in Computer Science*, 2. <https://doi.org/10.3389/fcomp.2020.00014>
8. Tang Y., Tran C., Li Xian, Chen P.-J., Goyal N., Chaudhary V., Gu J., Fan A. Multilingual Translation with Extensible Multilingual Pretraining and Finetuning, ArXiv, 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2008.00401
9. Rothe S., Mallinson J., Malmi E., Krause S., Severyn A. A Simple Recipe for Multilingual Grammatical Error Correction, ArXiv, 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2106.03830
10. Iosifov, I., et al. (2022). Natural Language Technology to Ensure the Safety of Speech Information. In Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II (pp. 216–226).
11. Wan Z., Wan X. A Syntax-Guided Grammatical Error Correction Model with Dependency Tree Correction, ArXiv, 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2111.03294
12. Wang X., Zhong W. Research and Implementation of English Grammar Check and Error Correction Based on Deep Learning, *Scientific Programming*, 2022, Vol. 2022, Article ID 4082082. DOI: 10.1155/2022/4082082
13. Rothe S., Narayan S., Severyn A. Leveraging Pre-trained Checkpoints for Sequence Generation Tasks, ArXiv, 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1907.12461.
14. Zhou W., Ge T., Mu C., Xu K., Wei F., Zhou M. Improving Grammatical Error Correction with Machine Translation Pairs, ArXiv, 2020. DOI: 10.48550/arXiv.1911.02825
15. Xue L., Constant N., Roberts A., Kale M., Al-Rfou R., Siddhant A., Barua A., Raffel C. mT5: A Massively Multilingual Pre-trained Text-to-Text Transformer, Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Online, Jun. 2021 : proceedings, pp. 483–498. DOI: 10.18653/v1/2021.naacl-main.41.
16. Amazon Product Reviews. *Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community*. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/arhamrumi/amazon-product-reviews> (date of access: 11.09.2023).
17. Twitter Sentiment Analysis. *Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community*. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/jp797498e/twitter-entity-sentiment-analysis> (date of access: 11.09.2023).
18. Flipkart Product reviews with sentiment Dataset. *Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community*. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/niraliivaghani/flipkart-product-customer-reviews-dataset> (date of access: 11.09.2023).

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-16>

УДК 621.391

Васильківський Микола Володимирович, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>

Прикмета Андрій Володимирович, аспірант,

Олійник Андрій Олегович, аспірант,

Ксьондз Назарій Олексійович, магістр.

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ ЛІТАЮЧИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ

Васильківський М.В., Прикмета А.В., Олійник А.О., Ксьондз Н.В. Оптимізація програмно-конфігурованих літаючих мереж доступу. Розглянуті технології використання БПЛА у мережах зв'язку відкривають нові перспективи для забезпечення зв'язку в умовах, де традиційні методи можуть бути менш ефективними або недосяжними. Здійсненні дослідження моделі спільного трафіку Інтернету Речей (IoT), Тактильного Інтернету (TI) і доповненої реальності (AR) зумовлюють покращення якості обслуговування та управління мережами в умовах зростаючого розповсюдження цих видів трафіку. Визначено, що ймовірність втрат пакетів для трафіку AR більша, ніж для трафіку IoT і менша, ніж для трафіку TI, що може бути важливим для дизайну мереж і розробки механізмів виправлення помилок. Запропонована модель дозволяє оцінювати якість обслуговування для різних видів трафіку, включаючи затримку доставки і ймовірність втрати пакета, що важливо для забезпечення заданих рівнів обслуговування та планування мережі. Отримані результати дослідження сприяють розумінню та оптимізації мереж з урахуванням різних видів трафіку та дозволяють покращити ефективність мережевих систем в умовах зростаючої складності і різноманітності вимог користувачів. Аналіз можливостей та ефективності спільного використання технологій програмно-конфігурованих мереж, граничних обчислень і БПЛА вказує на можливість інтеграції різних технологій для оптимізації мереж. Розроблена модель мережі, в якій програмно-конфігуровані мережі повністю реалізовані на БПЛА, є інноваційною і може відкрити нові можливості для розвитку мереж зв'язку, особливо в умовах недоступних місць і надзвичайних ситуацій, а також сприяє розвитку мережевих технологій та визначає важливі напрямки досліджень для покращення ефективності і якості обслуговування в сучасних мережах зв'язку.

Отримані результати дослідження вказують на значний внесок у розробку методів кластеризації та оптимізації мереж з використанням БПЛА. Використання методу k-середніх для кластеризації БПЛА вказує на ефективний спосіб групування та управління цими пристроями для оптимізації мережевих ресурсів. Алгоритм кластеризації на основі k-середніх дозволяє знайти оптимальні координати контролерів, відкриває можливість ефективної організації груп БПЛА для кращого управління мережею. Метод вивантаження трафіку, який включає можливість безпосередньої передачі інформації на БПЛА або через ретранслятори, вказує на гнучкість та адаптивність системи передачі даних. Використання алгоритму динамічного програмування для визначення розміру груп БПЛА та затримки для вивантаження трафіку підкреслює важливість оптимізації ресурсів і якості обслуговування. Отже, результати відкривають шляхи для подальших досліджень і розробки інноваційних систем керування мережами з використанням БПЛА, які можуть бути застосовані у різних галузях, включаючи телекомунікації, надзвичайні ситуації та інші області.

Ключові слова: інтернет речей, тактильний інтернет, доповнена реальність, програмно-конфігурована мережа, безпілотний літальний апарат, адаптивна система передачі даних, алгоритм динамічного програмування, літаюча мережа доступу, сенсорна мережа, граничні обчислення, система масового обслуговування.

Vasylykivskiy M.V., Prykmeta A.V., Oliynyk A.O., Ksondz N.O. Optimization of software-configurable flying access networks. The considered technologies for using UAVs in communication networks open up new prospects for providing communication in conditions where traditional methods may be less effective or unavailable. The research on the model of joint traffic of the Internet of Things (IoT), Tactile Internet (TI) and Augmented Reality (AR) leads to an improvement in the quality of service and network management in the context of the growing proliferation of these types of traffic. It has been determined that the probability of packet loss for AR traffic is higher than for IoT traffic and lower than for TI traffic, which can be important for network design and the development of error correction mechanisms. The proposed model allows us to evaluate the quality of service for different types of traffic, including delivery delay and packet loss probability, which is important for ensuring specified service levels and network planning. The obtained results of the study contribute to the understanding and optimization of networks taking into account different types of traffic and allow to improve the efficiency of network systems in the face of increasing complexity and diversity of user requirements. The analysis of the possibilities and efficiency of joint use of software-configurable networks, edge computing, and UAV technologies indicates the possibility of integrating different technologies to optimize networks. The developed network model, in which software-configurable networks are fully implemented on UAVs, is innovative and can open up new opportunities for the development of communication networks, especially in inaccessible places and emergencies, and also contributes to the development of network technologies and identifies important areas of research to improve the efficiency and quality of service in modern communication networks.

The results of the study indicate a significant contribution to the development of methods for clustering and optimizing networks using UAVs. The use of the k-means method for clustering UAVs indicates an effective way to group and manage these devices to optimize network resources. The k-means-based clustering algorithm allows you to find the optimal coordinates of the controllers, opening up the possibility of effectively organizing groups of UAVs for better network management. The method of traffic offloading, which includes the possibility of direct transmission of information to UAVs or through repeaters, indicates the flexibility and adaptability of the data transmission system. The use of a dynamic programming algorithm to determine the size of UAV groups and the delay for offloading traffic emphasizes the importance of optimizing resources and quality of service. Thus, the results open the way for further research and development of innovative network management systems using UAVs that can be applied in various fields, including telecommunications, emergency situations, and other areas.

Keywords: Internet of Things, haptic Internet, augmented reality, software-defined network, unmanned aerial vehicle, adaptive data transmission system, dynamic programming algorithm, flying access network, sensor network, edge computing, queuing system

Постановка наукової проблеми. Дослідження проблем створення мереж на основі спільного використання технологій БПЛА, програмно-конфігурованих мереж і граничних обчислень для забезпечення вимог до якості обслуговування в мережах зв'язку п'ятого покоління є важливим напрямком в розвитку телекомунікаційних технологій і мереж. Інновації в цій галузі в останні кілька років були вражаючими і призвели до створення нових можливостей і концепцій. Розвиток бездротових мереж і систем зв'язку стає ключовим фактором в сучасному світі, впливаючи на багато галузей, від медицини і виробництва до розваг і транспорту. Активна робота у цій області продовжується, і можна очікувати, що нові технології будуть надавати неймовірні можливості для подальшого розвитку суспільства [1].

Використання БПЛА у мережах зв'язку п'ятого покоління (5G) дійсно відкриває широкі можливості для різних сфер застосування. З врахуванням розвитку технологій 5G та автоматизованих систем керування, БПЛА можуть стати важливою складовою мережі майбутнього, яка буде підтримувати різноманітні сценарії застосування та вирішувати завдання у сфері зв'язку та обслуговування в умовах зростаючих вимог до мобільності та зв'язку [2].

Класифікація БПЛА за мережевими характеристиками є важливою для визначення їхньої придатності для різних застосувань у телекомунікаціях і мережах зв'язку. Вибір конкретного типу БПЛА залежить від конкретних потреб і вимог проекту, таких як покриття, обсяг передачі даних, тривалість польоту, вартість, а також регуляторні обмеження і умови використання. Застосування низьколітаючих БПЛА у мережах зв'язку може забезпечити покращену доступність, покриття та якість послуг для користувачів, особливо в областях з обмеженим інфраструктурним покриттям або в умовах екстрених ситуацій [3].

Дослідження та ідеї щодо використання БПЛА в сенсорних мережах (WSNs) є дуже цікавими і актуальними в контексті оптимізації збору даних і енергоспоживання в мережах сенсорів. Підходи для оптимізації роботи сенсорних мереж і зменшення енергоспоживання за допомогою використання БПЛА можуть бути корисними для різних застосувань, таких як моніторинг навколишнього середовища, віддалений моніторинг або надання допомоги в екстрених ситуаціях. Дослідження в цьому напрямку допомагають розвивати більш ефективні та енергоефективні мережі сенсорів з використанням передових технологій БПЛА [4].

Можливості застосування БПЛА у співпраці з мережами Інтернету Речей (IoT) дійсно вражає своєю широкою функціональністю та корисністю. Використання БПЛА в поєднанні з IoT показують значний потенціал для покращення різних галузей, зменшення витрат енергії та збільшення надійності збору та обробки даних. Дослідження та розвиток цих технологій продовжують надавати нові можливості для інтеграції БПЛА із мережами IoT з метою створення більш ефективних та стійких систем зв'язку і моніторингу [5]. Актуальність досліджень зумовлена необхідністю створення мереж зв'язку, які можуть ефективно відповідати на сучасні вимоги і забезпечувати надійне та швидке обслуговування користувачів у світі, де мережі постійно розширюються та змінюються.

Метою роботи є: способи оптимізації інтегрованих літаючих програмно-керованих мереж доступу для підвищення швидкості передачі даних та зменшення затримки за рахунок ефективного використання БПЛА.

Аналіз досліджень. Підтримка зв'язності в умовах відсутності інфраструктурного зв'язку є однією з ключових функцій БПЛА в мережах зв'язку. Ця можливість дозволяє забезпечити зв'язок між пристроями навіть в труднодоступних чи незвичайних умовах. Підсумовуючи, можна сказати, що БПЛА мають важливе значення у забезпеченні зв'язності в умовах відсутності інфраструктурного зв'язку або в умовах, коли потрібно оперативно забезпечити зв'язок у важкодоступних або надзвичайних ситуаціях. Ця технологія розширює можливості мереж зв'язку та допомагає вирішувати різноманітні завдання у різних галузях. Функціонування БПЛА як літаючих базових станцій (UAV-BS) є цікавим сценарієм в мережах майбутнього. Цей підхід дозволяє використовувати БПЛА для забезпечення додаткової ємності мережі та покращення покриття в умовах тимчасових заходів, важкодоступних місць, а також у надзвичайних ситуаціях. Щоб оптимізувати функціонування БПЛА як літаючих базових станцій, дослідники вивчають різні аспекти, такі як оптимальна висота розташування, управління рухом, мінімізація інтерференції та

забезпечення покриття для наземних користувачів. Це дозволяє забезпечити надійний і ефективний зв'язок в умовах, коли інші засоби зв'язку можуть бути недостатніми або недоступними [6].

Функціонування БПЛА як мобільних ретрансляторів для подолання перешкод у мережах зв'язку є важливим сценарієм, особливо в умовах, коли потрібно забезпечити надійний зв'язок між віддаленими користувачами та базовою станцією. Загалом, використання БПЛА як мобільних ретрансляторів дозволяє підвищити надійність та доступність зв'язку в умовах, коли інші засоби зв'язку можуть бути неефективними або недоступними. Використання БПЛА для бездротової транзитної передачі є дієвим способом подолання обмежень та забезпечення надійного зв'язку в мережах радіодоступу, особливо в умовах географічних обмежень та перешкод. В цілому, використання БПЛА для транзитної передачі може значно підвищити продуктивність і надійність мереж радіодоступу, зокрема в умовах обмежень, перешкод і географічних факторів [7].

Використання БПЛА в мережах 5G дозволяє оптимізувати розподіл обчислювальних ресурсів, підвищити надійність зв'язку та забезпечити більш ефективне управління ресурсами мережі для задоволення потреб різних користувачів і послуг. Концепція граничних обчислень MEC вирішує проблеми з обчислювальною потужністю та тривалістю життя батареї для пристроїв IoT та інших пристроїв з обмеженими ресурсами. Додавання БПЛА до цієї концепції може покращити її ефективність та розширити можливості. Загалом, використання БПЛА для підтримки концепції граничних обчислень може значно покращити якість обслуговування, знизити енергоспоживання та сприяти розвитку IoT та інших ресурсомістких додатків [8].

Перенесення обчислень на віддалені граничні сервери (MEC) може допомогти поліпшити обчислювальні можливості БПЛА і вирішити обмеження, пов'язані з їхнім обчислювальним ресурсами та обмеженими розмірами. Такий підхід дозволяє БПЛА використовувати віддалені обчислювальні ресурси для виконання складних обчислень, які перевищують їхні можливості. Однак важливо враховувати, що оптимізація та управління розподілом обчислень між БПЛА та серверами MEC можуть вимагати розробки ефективних алгоритмів та стратегій, особливо в умовах обмежених ресурсів та змінних умов польоту БПЛА [9].

Розгортання БПЛА з можливістю кешування відкриває нові можливості для покращення якості обслуговування користувачів в бездротових мережах. Узагальнюючи, використання БПЛА з підтримкою кешування може значно покращити продуктивність та ефективність бездротових мереж, що призводить до задоволення потреб користувачів та зниження витрат на обслуговування мережі [10].

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Розвиток та впровадження нових мережевих технологій і архітектур дуже важливий для забезпечення високої якості обслуговування та забезпечення потреб сучасних користувачів і пристроїв у глобальному мережевому середовищі. Застосування SDN перетворює мережі зв'язку, забезпечуючи більшу гнучкість, оптимізацію ресурсів і краще управління трафіком. Такі технології стають невід'ємною частиною розвитку мереж п'ятого і наступних поколінь. В цілому, рівень додатків є ключовою складовою програмно-конфігурованих мереж SDN, яка дозволяє надавати різноманітні послуги користувачам і забезпечувати ефективне управління та функціонування мережі. Усі функції рівня управління допомагають забезпечити ефективне функціонування програмно-конфігурованої мережі SDN, підвищуючи її надійність, ефективність і гнучкість. Усі функції рівня даних допомагають забезпечити надійну та ефективну передачу даних в мережі SDN, забезпечуючи виконання інструкцій, визначених на рівні управління, та забезпечуючи безпеку і відмовостійкість мережі. Завдяки відкритим інтерфейсам, SDN надає можливість розробляти і впроваджувати різноманітні мережеві додатки та сервіси, що робить цю технологію дуже гнучкою і адаптованою до конкретних потреб мережі [11].

Важливо відзначити, що південний інтерфейс (наприклад, OpenFlow) забезпечує стандартизований спосіб взаємодії між контролерами і мережевими пристроями, тоді як північний інтерфейс є більш гнучким і дозволяє розробникам створювати різноманітні додатки та послуги для управління мережею, відповідно до конкретних потреб бізнесу або користувачів. Абстрактна модель поділу рівнів в архітектурі мережі SDN допомагає створити більш гнучку та ефективну мережеву інфраструктуру. Абстрактна архітектура дозволяє розділити функціональність мережі на два рівні і забезпечує стандартизацію інтерфейсів, що робить розробку та управління мережею більш прозорими та ефективними завдяки зменшенню складності та підвищенню гнучкості мережевої інфраструктури [1-3].

Додатково, важливо відзначити, що проблема розміщення контролерів є однією з ключових проблем у мультиконтролерних програмно-конфігурованих мережах SDN. Ця проблема стоїть © Васильківський М.В., Прикмета А.В., Олійник А.О., Ксьондз Н.О.

перед великими викликами, оскільки правильний розподіл контролерів може суттєво вплинути на продуктивність, масштабованість, надійність та вартість мережі SDN. Для вирішення цих проблем дослідники використовують різні методи, включаючи математичне моделювання, алгоритми оптимізації, машинне навчання та експериментальні підходи. Процес розміщення контролерів може бути динамічним і реагувати на зміни у мережі та трафіку, щоб забезпечити ефективну роботу мережі SDN [4].

В мережах SDN існують різні стратегії для фізичного і логічного розподілу ресурсів і контролерів, які потребують ефективної взаємодії між контролерами для обміну інформацією про стан сусідніх доменів, а також для вирішення проблем та оптимізації ресурсів. Вибір конкретної стратегії залежить від характеристик мережі, вимог до мережі та обсягу координації між контролерами.

Протокол HyperFlow представляє собою важливий крок у розвитку архітектур керування мережами SDN. Основна ідея HyperFlow полягає в розподіленому керуванні мережею з використанням локальних контролерів та співпраці між ними для ефективного управління мережею. Загалом HyperFlow і система Onix роблять акцент на розподіленому керуванні мережею, що дозволяє покращити масштабованість, надійність і продуктивність мереж SDN. Вони допомагають вирішувати проблеми, пов'язані з управлінням великими та складними мережами, і впроваджують нові методи координації між контролерами та комутаторами для забезпечення ефективного функціонування мережі SDN [5].

Дослідження розробок у сфері масштабованості мереж SDN добре відображає різноманітні підходи та стратегії, які використовуються для поліпшення масштабованості та продуктивності таких мереж. Розподіл NIB дозволяє кожному контролеру зберігати та керувати інформацією лише для свого сегмента мережі. Це зменшує навантаження на кожен контролер та дозволяє масштабувати мережу. Ієрархічна структура контролерів, де контролери об'єднуються в кластери, дозволяє краще керувати розподіленими мережами. Це може поліпшити координацію та керування на різних рівнях мережі. Забезпечення взаємодії між додатками та контролерами є ключовим аспектом для забезпечення стійкості та ефективності мережі. Механізми сумісності та стійкості станів допомагають уникнути конфліктів та непередбачуваних станів. STN надає інтерфейс для узгодженості політики обслуговування трафіку між контролером та площиною даних. Це допомагає забезпечити коректну роботу та зменшити ризик конфліктів політик. ElasticCon динамічно розподіляє навантаження між контролерами, що дозволяє керувати навантаженням на контролери в реальному часі. Це важливо для забезпечення оптимального використання ресурсів. Система DISCO використовує кластеризацію контролерів для управління різними доменами мережі та обміну інформацією між контролерами. Це дозволяє забезпечити гнучкість мережі при зміні конфігурації. Методика маршрутизації потоку допомагає визначити, який контролер буде керувати певним потоком. Це може базуватися на різних факторах, включаючи стан мережі та навантаження на контролери. Ці підходи та системи спрямовані на вирішення проблем масштабованості в мережах SDN, забезпечуючи кращий розподіл завдань та ресурсів між контролерами, а також полегшуючи координацію та управління мережею в умовах збільшеного обсягу даних і трафіку. Вони допомагають зробити мережі SDN більш гнучкими, надійними та ефективними [6].

Ієрархічна архітектура SDN, яка включає багаторівневий рівень управління, може бути ефективним рішенням для поліпшення масштабованості та продуктивності мережі SDN (рис. 1) [7].

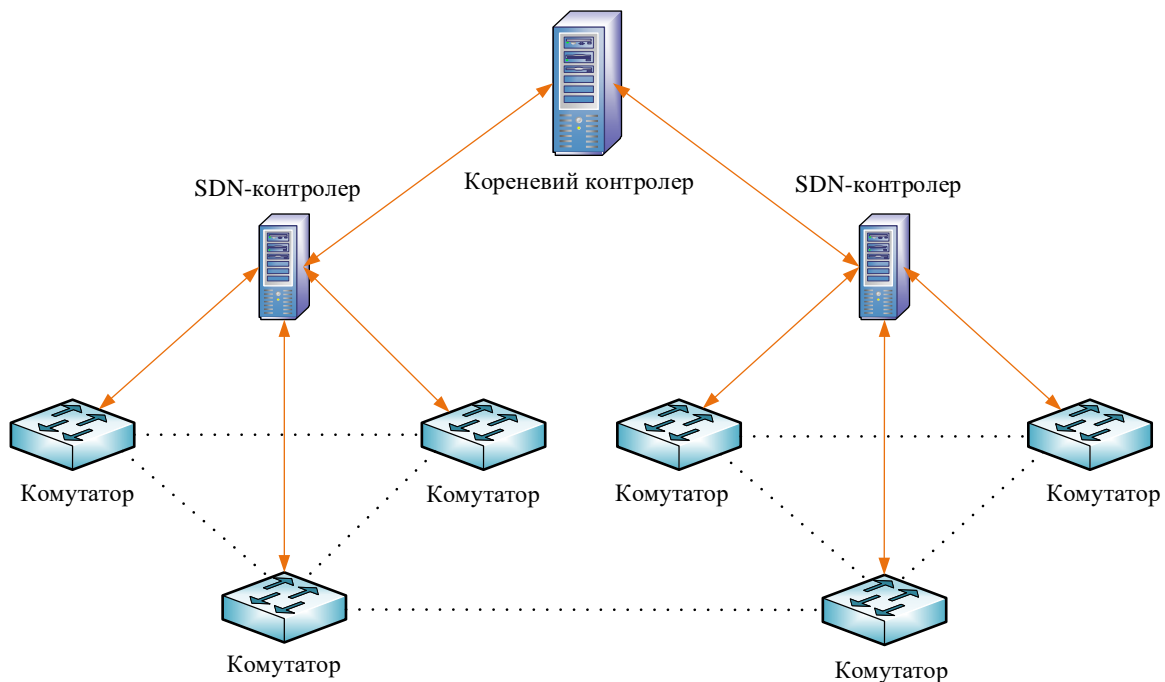


Рисунок 1 – Ієрархічна мультиконтролерна мережа SDN

Така ієрархічна архітектура може бути корисною для великих та складних мереж SDN, де необхідно ефективно розподіляти завдання між різними рівнями керування та зменшувати навантаження на централізовану площину управління. Ця архітектура також сприяє покращенню масштабованості та ефективності мережі SDN, що дозволяє краще відповідати потребам великих та розподілених мережевих середовищ. Архітектурні рішення та підходи до організації площини управління в мережах SDN відображають багатоаспектність та різноманітність можливих підходів до оптимізації масштабованості, ефективності та робастності таких мереж [8].

Мережі БПЛА можуть значно виграти від впровадження концепцій та технологій SDN. Система для управління зв'язком БПЛА на основі SDN використовує контролер SDN для оптимізації використання мережевих ресурсів, зниження затримок та підвищення пропускної здатності мережі БПЛА. Централізований контролер дозволяє забезпечувати ефективне керування трафіком і пріоритетами пакетів. Централізована диференціальна маршрутизація трафіку (TDR) використовує два контролери - контролер координації та контролер кластера SDN. Це допомагає забезпечити високий рівень якості обслуговування (QoS) і надійності для з'єднань, чутливих до затримок, у мережах БПЛА. Гібридна технологія SDN для мереж БПЛА та IoT використовує гібридний підхід, де деякі БПЛА працюють у мережах SDN, а інші використовують традиційні протоколи маршрутизації. Це дозволяє різним типам БПЛА співіснувати та співпрацювати в одній мережі. Багатошляхова маршрутизація на основі SDN використовує багатопланову графову модель для планування маршрутів у тривимірному просторі, щоб забезпечити стійкість мережі і уникнути перекриття маршрутів. Архітектура мережі мобільних датчиків на основі SDN спрямована на підвищення доступності та забезпечення надійного передавання даних у роях БПЛА. Вона використовує централізований сервер SDN для ефективного керування роями БПЛА та управління мережею. Літаюча всепроникна сенсорна мережа (FUSN) на основі SDN у якій БПЛА виступають як програмні комутатори та контролери, що дозволяє ефективно збирати дані від мобільних датчиків на землі. Це може спростити збір та обробку інформації у реальному часі. Використання предиктивної SDN для підвищення доступності мережі забезпечує можливість передбачати майбутнє розташування БПЛА та планувати маршрути та зміни топології заздалегідь, що допомагає максимально підвищити доступність мережі. Ці архітектурні рішення розвиваються для забезпечення оптимального управління мережами БПЛА, підвищення надійності та зниження затрат. Однак важливо враховувати особливості конкретних застосувань та вимоги до мережі при виборі підходу до її організації.

Розглянемо важливі тенденції у розвитку телекомунікаційних технологій, особливо у контексті мереж 5G і їх впливу на різні аспекти сучасного життя. Інтернет речей (IoT) стає все більш важливим елементом телекомунікаційних мереж. Це дозволяє підключати мільярди пристроїв і датчиків до мережі, що веде до доступності великої кількості інформації та можливості розвивати

аналітичні та прийняття рішень. Технологія тактильного інтернету передбачає ультрамалі затримку і високий рівень якості обслуговування і використовується для взаємодії між людьми та машинами в режимі реального часу, такими як роботи і аватари. Вона може використовувати різні мережеві технології для досягнення своїх цілей. Доповнена реальність (AR) вимагає низької затримки та використовується в різних додатках, включаючи галузі як медицина, ігрова індустрія, технічне обслуговування тощо. Вона створює вимоги до мереж зв'язку, таких як доступність, надійність і стабільність. Трафік, створюваний пристроями IoT, має свої особливості і вимагає досліджень та оцінки впливу на якість обслуговування (QoS). Розроблено моделі трафіку та методи оцінки QoS для IoT, що допомагає оптимізувати мережеві ресурси. Загалом, концепція IoT перетворює наше оточення в "розумний світ", де об'єкти можуть спілкуватися, виконувати завдання і полегшувати життя людей і підприємств. Ця концепція відіграє важливу роль у розвитку телекомунікаційних технологій і динамічному зміні способу, яким ми взаємодіємо з технологією. Отже, IoT є ключовою технологічною концепцією, яка перетворює спосіб, яким ми взаємодіємо з технологією та нашим оточенням. Ця концепція відкриває безмежні можливості для підключення та використання різних об'єктів у реальному часі і має широкий вплив на інфокомунікаційну галузь. Усі ці аспекти вказують на необхідність постійного розвитку і адаптації телекомунікаційних мереж до різноманітних вимог, які ставлять перед ними нові технології і застосунки. Такий розвиток веде до покращення доступності послуг і розширення можливостей для споживачів і підприємств у всіх сферах життя [9].

Робота з аналітичною моделлю для оцінювання QoS в мережах 5G та інших поколінь має важливе значення, оскільки вона дозволяє аналізувати вплив різноманітного трафіку на якість обслуговування та сприяє розвитку телекомунікаційних технологій і допомагає забезпечити високу якість обслуговування в умовах зростаючого обсягу різноманітного трафіку в мережах 5G та подальших поколінь.

Тактильний Інтернет є захоплюючим напрямком розвитку інфокомунікаційних технологій, який має потенціал змінити спосіб, яким ми взаємодіємо з оточуючим світом і іншими людьми. Цей напрямок орієнтований на передачу в реальному часі тактильних відчуттів і відкриває безмежні можливості для інтерактивних застосунків та дистанційного керування фізичними об'єктами. Отже, тактильний Інтернет відкриває нові горизонти для інтерактивності, контролю та спілкування у реальному часі. Він вже став об'єктом активних досліджень і розвитку, і має потенціал вплинути на багато аспектів нашого повсякденного життя та промисловості [10].

Доповнена реальність (AR) відкриває безмежні можливості для розширення нашого сприйняття світу і покращення взаємодії з ним. AR дозволяє накладати віртуальну інформацію на реальний світ, створюючи інтерактивний інтерфейс для користувачів. У цілому, доповнена реальність є важливим напрямком розвитку інфокомунікаційних технологій, який може змінити спосіб, яким ми сприймаємо та взаємодіємо зі світом навколо нас. Вона відкриває нові можливості для навчання, розваг, роботи та багато інших сфер нашого життя.

Моделі трафіку грають важливу роль в розумінні та управлінні мережами, дозволяючи аналізувати та передбачати роботу мережі в різних сценаріях та умовах. Різні типи послуг, такі як перегляд веб-сторінок, електронна пошта, потокове мультимедіа і VoIP, можуть генерувати різні обсяги трафіку та мати різні вимоги щодо якості обслуговування. Розуміння цих типів послуг є важливим для ефективного управління мережею. Вимірювання обсягу трафіку, що генерується кожною послугою, допомагає визначити, які послуги є найбільш вимогливими до ресурсів мережі. Це може бути корисним для розподілу ресурсів і планування мережі. Визначення часу, коли трафік досягає свого максимального рівня, допомагає розробникам мережі планувати і розгортати ресурси так, щоб вони могли витримувати навантаження в пікові часи. Розуміння імітації потоку запитів, який користувачі створюють під час взаємодії з мережею, допомагає у визначенні оптимальної обробки цих запитів, зокрема для забезпечення низької затримки та високої доступності. Розрізняючи між однорідним і гетерогенним трафіком, можна краще розуміти різноманітність трафіку в мережі. Це важливо для налагодження ресурсів і прийняття рішень щодо мережевого управління. Визначення функції розподілу часових інтервалів між запитами допомагає в моделюванні та прогнозуванні трафіку в реальному часі. Застосування моделей трафіку допомагає мережевим інженерам і адміністраторам планувати, розгортати і управляти мережами більш ефективно, забезпечуючи високу якість обслуговування для різних типів послуг і користувачів [11].

Моделі трафіку є необхідними для оптимізації ресурсів мережі, планування капіталовкладень та забезпечення надійності та ефективності мережевого обслуговування. Вони допомагають розуміти та аналізувати складність трафіку в сучасних мережах зв'язку, зокрема в Інтернеті. У

© Васильківський М.В., Прикмета А.В., Олійник А.О., Ксьондз Н.О.

реальних мережах трафік часто не є ідеальною моделлю Пуасона або групового пуасонівського потоку. Тому важливо також мати можливість адаптувати моделі до конкретних умов і спостерігати за реальним трафіком для забезпечення ефективності мережі. Особливо у сучасних мережах, таких як Інтернет, де трафік може бути дуже різноманітним і динамічним, а аналіз самоподібного трафіку може бути корисним інструментом для оптимізації ресурсів і мережевого управління [1, 2].

Різні мережі можуть вимагати різних підходів до обслуговування, залежно від їх особливостей та вимог користувачів. Правильний вибір дисципліни обслуговування та адекватне моделювання трафіку можуть допомогти забезпечити високу якість обслуговування в мережі. Знання теорії масового обслуговування та використання математичних моделей допомагають інженерам і адміністраторам мереж зрозуміти, аналізувати та оптимізувати роботу мережі зв'язку для забезпечення надійного та ефективного обслуговування користувачів.

Запропонована системна модель включає три види генераторів трафіку і об'єднує їх в один вузол, де потік надходить у систему масового обслуговування (СМО) з комбінованою дисципліною обслуговування, як показано на рисунку 2.

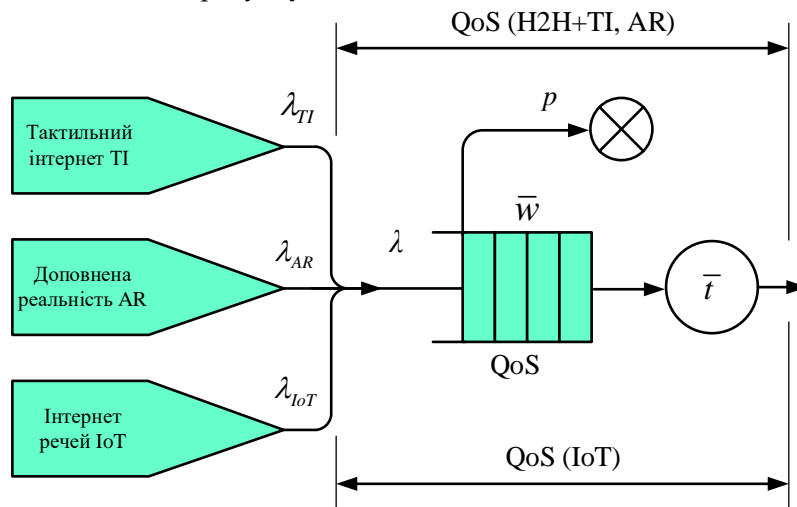


Рисунок 2 – Системна модель

Об'єднання цих типів трафіку в один вузол і подальший аналіз у системі масового обслуговування з комбінованою дисципліною обслуговування допомагають визначити, як мережа впорається з різними видами трафіку та як можливо поліпшити якість обслуговування для різних типів користувачів і пристроїв. Це моделювання може бути корисним для аналізу та тестування якості обслуговування мережі в умовах різних видів трафіку та навантажень.

У подальшому аналізі важливо буде врахувати характеристики кожного типу трафіку, такі як інтенсивність надходження, обсяги даних, та реакцію мережі на цей трафік для забезпечення оптимальної якості обслуговування.

Для оцінки QoS розглядається ймовірність відмови в обслуговуванні (втрати пакетів) і затримка пакетів. Ці метрики допомагають визначити, наскільки ефективно мережа зв'язку впоралася з різними типами трафіку. Особливо важливо це для послуг, де затримка та надійність є критичними, наприклад, для медичних систем або систем безпеки. Дослідження цих аспектів допомагає визначити оптимальні стратегії для управління різними типами трафіку IoT для забезпечення високої якості обслуговування в мережах зв'язку.

Розглянемо аналітичну модель для оцінки ймовірності втрат і затримки пакетів за рахунок часу очікування в черзі та тривалості обслуговування, представлену моделлю G/G/1/k. Для оцінки ймовірності втрати пакетів за відомих параметрів розподілу, що описують трафік і процес обслуговування пакетів [4], може бути використано вираз:

$$p = \frac{1-p}{2} p^{\frac{2}{C_a^2 + C_s^2} n_b} \quad (1)$$

$$\frac{1-p}{1-p^{\frac{2}{C_a^2 + C_s^2} n_b + 1}}$$

де ρ - завантаження системи; n_b - розмір буфера; C_a^2 і C_s^2 - квадратичні коефіцієнти варіації розподілу вхідного потоку і тривалості обслуговування відповідно.

Рівняння для оцінки часу доставки пакетів [5]:

$$T = \frac{p\bar{t}}{2(1-p)} \left(\frac{\sigma_a^2 + \sigma_s^2}{\bar{t}^2} \right) \left(\frac{\bar{t}^2 + \sigma_s^2}{\bar{a}^2 + \sigma_s^2} \right) + \bar{t} \quad (2)$$

де σ_a^2 і σ_s^2 - значення дисперсій інтервалу часу між надходженням пакетів і тривалості обслуговування відповідно; \bar{a} - середнє значення інтервалу між пакетами; \bar{t} - середня тривалість обслуговування.

Відомо, що потоки трафіку TI і AR мають властивості самоподібних потоків. Трафік же IoT можна віднести до детермінованих потоків [6], оскільки найчастіше в додатках IoT цей трафік формується шляхом періодичного процесу надсилання даних системи моніторингу та/або диспетчерського управління [7].

Безпілотні літальні апарати мають значний потенціал для розширення можливостей мереж зв'язку та інфраструктури. Ключові аспекти цього застосування: збільшення зони покриття, передача інформації від віддалених користувачів, збір даних із сенсорних полів, інтеграція з програмно-конфігурованими мережами (SDN), мережі граничних обчислень, ретрансляція. Системи 5G і мережі безпілотних літальних апаратів можуть спільно працювати, надаючи більше можливостей для забезпечення покращеного зв'язку та розвитку нових застосувань у різних сферах. Такі інновації можуть покращити якість обслуговування, зменшити затримки та сприяти покращенню підключення до мережі для різних сценаріїв використання. Проте, важливо також враховувати питання безпеки та приватності, пов'язані з використанням БПЛА та збором даних у високою області. Для успішної реалізації цих технологій потрібно вирішити багато технічних та регуляторних викликів [8].

Різні архітектурні підходи для організації мереж БПЛА демонструють різні способи взаємодії між літаючим і наземним сегментами мережі. Кожен з цих підходів має свої переваги і недоліки, і вибір конкретної архітектури може залежати від конкретних вимог і обставин в конкретному застосуванні: централізована архітектура, архітектура кластеризації, стільникова архітектура. Вибір конкретної архітектури залежатиме від конкретних вимог і обмежень запланованого проекту. Для забезпечення надійності та ефективності мереж БПЛА важливо також враховувати можливості автоматизації, адаптації до змінних умов, розподілу ресурсів та забезпечення безпеки мережі.

Аналіз застосування концепції програмно-конфігурованих мереж (SDN) для мереж БПЛА відображає потенціал цієї технології у розвитку та управлінні мережами БПЛА. Переваги використання SDN в мережах БПЛА: гнучкість і динамічність; вдосконалення якості обслуговування (QoS); скорочення часу реакції; забезпечення безпеки мережі. Загалом, SDN може значно поліпшити управління та ефективність мереж БПЛА, але вимагає детального проектування, врахування специфічних вимог і обмежень цих мереж, а також вирішення викликів.

Запропонований спосіб організації мережі БПЛА для збирання даних із сенсорних полів за використання технології SDN має потенціал для ефективного управління і збору інформації в умовах розподіленої мережі БПЛА та різної щільності сенсорних полів. Основні аспекти цього підходу варто розглянути більш детально: використання стаціонарних прив'язних БПЛА як контролерів SDN; розподілена структура мережі; вибір прив'язних БПЛА; управління потоками даних; маршрутизація БПЛА. Такий підхід має потенціал для оптимізації збору даних з сенсорних полів за допомогою мереж БПЛА та використання технології SDN для ефективного управління мережею. Однак варто враховувати, що розгортання такої системи вимагає детального проектування та урахування різноманітних факторів, включаючи фізичні обмеження БПЛА, споживання енергії та надійність зв'язку [9].

Описаний спосіб організації мережі БПЛА для збору даних із сенсорних полів застосовує алгоритми k-середніх та FOREL для формування кластерів БПЛА та визначення маршруту руху груп БПЛА. Розглянемо ці алгоритми та їх використання. Алгоритм k-середніх (k-means) є ефективним методом для розділення об'єктів (БПЛА) на групи (кластери) на основі схожості їхніх характеристик. Зокрема використовуємо його для формування кластерів БПЛА в мережі. Перед виконанням алгоритму, потрібно визначити кількість кластерів, на які буде розділена мережа. Це може вимагати аналізу щільності БПЛА та властивостей сенсорних полів. Після визначення кількості кластерів, алгоритм k-середніх обчислює центри кластерів таким чином, щоб вони були представниками групи БПЛА, що належать до кожного кластера.

Алгоритм FOREL (Fuzzy RELation) допомагає визначити радіуси кластерів. Ці радіуси можна використовувати для визначення територій, які обслуговуються групами БПЛА. Центри кластерів, які були визначені алгоритмом k-середніх, можуть використовуватися як точки руху груп БПЛА.

Кожна група БПЛА може обслуговувати територію, яка відповідає центру її кластера. Групи БПЛА можуть вибирати оптимальний маршрут руху на основі центрів кластерів та радіусів кластерів. Оптимальний маршрут може включати в себе обхід сенсорних полів, щоб ефективно зібрати дані. Важливо відзначити, що визначення кількості кластерів і радіусів кластерів є ключовими кроками, і їх вибір повинен бути обґрунтованим на основі конкретних умов і потреб вашої мережі БПЛА. Такий підхід до організації мережі дозволяє ефективно збирати дані з сенсорних полів за допомогою груп БПЛА та використовувати алгоритми кластеризації та визначення маршруту для оптимізації збору даних [10]. Алгоритм k-середніх показано на рисунку 3.

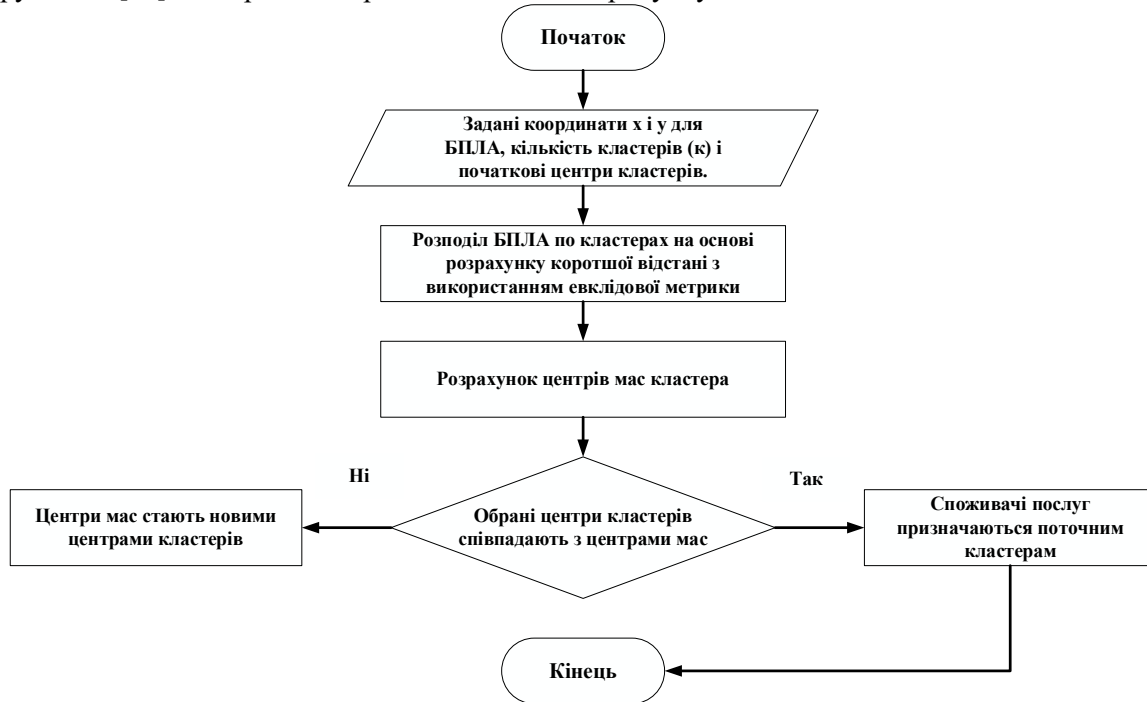


Рисунок 3 – Алгоритм k-середніх для БПЛА

Послідовність дій для мережі БПЛА з інтеграцією технологій SDN охоплює важливі аспекти організації мережі для збору даних з сенсорних полів. Однак, для покращення розуміння та реалізації цих кроків, важливо врахувати деякі подробиці та додати можливі перевірки і регулювання для оптимізації роботи мережі. Отже, послідовність виконання алгоритму: формування кластерів БПЛА з використанням алгоритму кластеризації k-середніх; початковий вибір головного вузла в кожному кластері; визначення області збору інформації для кожного кластера БПЛА; визначення маршруту руху для кожного кластера з використанням алгоритму FOREL; передача даних мережею БПЛА. Така послідовність дій враховує роботу мережі БПЛА в умовах змінюваної ситуації та взаємодії між різними частинами мережі. Доцільно також реалізувати механізми для вирішення можливих проблем, таких як втрати зв'язку чи виходження з ладу БПЛА [11].

Використання БПЛА для реалізації мобільних граничних обчислень може значно поліпшити продуктивність та ефективність обчислень IoT-пристроїв та зменшити затримки у передачі даних до центральних серверів. Воно може забезпечити важливу підтримку для обробки даних у реальному часі та забезпечити надійний обмін даними між пристроями IoT та центральними обчислювальними ресурсами. Можливості обчислення на основі MEC (Mobile Edge Computing) на базі БПЛА включають в себе обробку даних, розподіл обчислень, а також можливість взаємодії з іншими обчислювальними вузлами. Ця технологія має потенціал вдосконалити обчислювальні мережі IoT і забезпечити швидку та ефективну передачу даних для подальшого аналізу і прийняття рішень [1, 3].

Дослідження та алгоритми, пов'язані з інтеграцією БПЛА та мереж мобільного обчислення (MEC). Ці дослідження вирішують важливі завдання оптимізації та вдосконалення взаємодії між БПЛА та MEC для підтримки обчислень і передачі даних, забезпечення ефективної обробки даних і обчислень в реальному часі. Їх результати можуть бути важливими для подальшого розвитку мереж безпілотних літальних апаратів та мобільного обчислення в контексті Інтернету речей (IoT) та інших додатків.

У разі граничних хмарних обчислень на віддаленому сервері, коли обчислювальне завдання і

вузлів IoT (наземних датчиків) передаватиметься на граничний хмарний сервер через БПЛА-ретранслятор і там буде оброблятися, затримку передачі від БПЛА-ретранслятора на граничний хмарний сервер обчислювальної задачі і вузла IoT (наземні датчики) можна виразити як:

$$T_{UAV-server}^{trans} = \frac{S_i}{D_{UAV}} \quad (3)$$

Затримка передачі обчислювального завдання і від вузла IoT (наземні датчики) до граничного хмарного сервера може бути виражена як:

$$T_{server}^{process} = \frac{C_i}{F_{server}} \quad (4)$$

де F_{server} - обчислювальні можливості граничного хмарного сервера.

Отже, загальна тривалість передачі інформації для граничного хмарного сервера та тривалості обробки становитиме на основі підсумовування (3) та (4):

$$T_{server}^{total} = T_{IoT-UAV}^{trans} + T_{UAV-server}^{trans} + T_{server}^{process} \quad (5)$$

$$T_{server}^{total} = \frac{S_i}{D_{IoT}} + \frac{S_i}{D_{UAV}} + \frac{C_i}{F_{server}} \quad (6)$$

Загальну тривалість з урахуванням використання літаючого сегмента можна визначити таким чином:

$$T_i^{total} = \alpha T_{UAV-MEC}^{total} + (1 - \alpha) T_{server}^{total} \quad (7)$$

Моделювання було виконано з використанням пакета програм Matlab. Вихідні дані для моделювання наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 - Параметри моделювання

Параметр	Значення
Кількість задач N	15
Об'єм даних S_i	10–30 MB
CPU цикли C_i	1900 Cycle/s
Тривалість $T_i^{constraint}$	0,002 s
Швидкість передачі даних D_{IoT}, D_{UAV}	3–9 Mbps
Частота процесора UAV-МЕС (F_{UAV})	500 MHz
Частота процесора сервера граничних розрахунків (F_{server})	10 GHz

Число завдань встановлено рівним $N = 15$, а число IoT вузлів (наземних датчиків) - 5. Частоти процесорів БПЛА-МЕС і сервера граничних обчислень становлять 500 МГц і 10 ГГц відповідно. Обсяг даних випадковим чином збільшується з 10 до 30 мегабайт. Залежно від відстані швидкість передачі даних також змінювалася випадковим чином від 3 до 9 Мбіт/с, що означає, що на коротших відстанях досяжна більша швидкість передачі. Відповідно, для зменшення затримки виконання обчислювального завдання необхідно збільшити або обчислювальну потужність БПЛА- МЕС, або збільшити кількість БПЛА- МЕС. Дослідження і результати розвитку мереж БПЛА з інтеграцією технологій програмно-конфігурованих мереж (SDN), граничних обчислень і мереж мобільного обчислення (МЕС) передбачають: спільне використання технологій; архітектурний підхід для побудови мережі, де програмно-конфігуровані мережі повністю реалізовані на БПЛА; методи кластеризації для побудови кластерів БПЛА для організації та управління мережею БПЛА; методи вивантаження трафіку з наземної мережі на БПЛА, що може підвищити ефективність передачі даних та зменшити затримки; алгоритм динамічного програмування є інноваційним підходом для вибору оптимального розміру групи БПЛА; оптимізація затримок і енергоспоживання, що робить їх практично важливими для реалізації в сучасних мережах БПЛА. Загалом, робота важлива для подальшого розвитку і вдосконалення мереж БПЛА та їх інтеграції з іншими технологіями. Методи і підходи можуть мати значущий вплив на розвиток дієвих та продуктивних систем мобільного обчислення з використанням БПЛА.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Аналіз можливостей інтеграції БПЛА і наземних мереж зв'язку п'ятого та наступних поколінь свідчить про великий потенціал цієї інтеграції. Основні переваги такої інтеграції дозволяють покращити якість зв'язку та забезпечити більш гнучку та ефективну мережу. Інтеграція БПЛА в мережу зв'язку стає все більш актуальною і

важливою, особливо у сучасних умовах, коли зростає попит на бездротові послуги в різних сценаріях застосування. Ця інтеграція відкриває нові можливості для покращення зв'язку та розширення функціональності мереж зв'язку п'ятого покоління та наступних.

Загалом, інтеграція SDN з мережами БПЛА відкриває нові можливості для поліпшення функціональності, продуктивності і розгортання цих мереж. Переваги програмованості і гнучкості SDN можуть бути використані для ефективного управління та оптимізації ресурсів у мережах БПЛА, що стає все важливішим у сучасному світі автономних систем.

Виконане дослідження має важливі наукові та практичні висновки щодо моделювання та аналізу трафіку в мережах зв'язку п'ятого та наступних поколінь. Основні результати дослідження стосуються властивостей трафіку та його впливу на якість обслуговування в таких мережах. Зокрема, запропоновано модель трафіку, яка об'єднує трафік Інтернету речей, тактильного Інтернету та доповненої реальності. Ця модель дозволяє враховувати різні характеристики цих видів трафіку, включаючи ймовірність втрати пакетів та самоподібність потоку з параметром Херста $H = 0,7$. Розглянута модель дозволяє оцінити якість обслуговування не лише окремих типів трафіку, але і їх комбінацію. При цьому, визначено вплив властивостей об'єднаного потоку трафіку на його якість обслуговування, зокрема, на ймовірність втрати пакетів та затримку доставки. Отримані результати показали, що інтенсивність навантаження впливає на якість обслуговування. Збільшення навантаження може призвести до більшої ймовірності втрати пакетів, а зменшення - до домінування властивостей вхідного потоку.

Гетерогенний характер трафіку в мережах зв'язку п'ятого та наступних поколінь вказує на необхідність використання різних ресурсів, включаючи БПЛА, для забезпечення якості обслуговування та сприятливого сприйняття користувачами. Здійснено важливий внесок у розуміння трафіку та його впливу на мережі зв'язку майбутніх поколінь. Отримані результати можуть бути корисними для планування та оптимізації таких мереж, а також для визначення стратегій обслуговування трафіку різних типів у цих мережах.

Список бібліографічного опису

1. Cui, Y. and all. Space-Air-Ground-Integrated Network (SAGIN) for 6G⁺ Requirements, Architectures and Challenges. China Telecommunications, 2022, v.19, issue 2, pp. 90-108.
2. Qiu, Junfei. Radio Resource Management for Unmanned Aerial Vehicle Assisted Wireless Communications and Networking. Diss. University of York, 2021.
3. Z. Sheng, H. D. Tuan, T. Q. Duong, and L. Hanzo, "UAV-aided two-way multi-user relaying," IEEE Transactions on Communications, vol. 69, no. 1, 2021., pp. 246–260.
4. S. Ahmed, M. Z. Chowdhury, and Y. M. Jang, "Energy-efficient UAV relaying communications to serve ground nodes," IEEE Communications Letters, vol. 24, no. 4, 2020., pp. 849–852.
5. X. Xi, X. Cao, P. Yang, J. Chen, T. Q. Quek, and D. Wu, "Network resource allocation for eMBB payload and URLLC control information communication multiplexing in a multi-UAV relay network," IEEE Transactions on Communications, vol. 69, no. 3, 2020., pp. 1802–1817.
6. Z. Hadzi-Velkov, S. Pejoski, N. Zlatanov, and R. Schober, "UAV-assisted wireless powered relay networks with cyclical NOMA-TDMA," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 9, no. 12, 2020., pp. 2088–2092.
7. B. Ji, Y. Li, D. Cao, C. Li, S. Mumtaz, and D. Wang, "Secrecy performance analysis of UAV assisted relay transmission for cognitive network with energy harvesting," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 7, 2020., pp. 7404–7415.
8. J. Yang, S. Xiao, B. Jiang, H. Song, S. Khan, and S. U. Islam, "Cache-enabled unmanned aerial vehicles for cooperative cognitive radio networks," IEEE Wireless Communications, vol. 27, no. 2, 2020., pp. 155–161.
9. Y. Zhang, T. T. Liu, H. G. Zhang, and Y. A. Liu, "LEACH-R: LEACH relay with cache strategy for mobile robot swarms," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, no. 2, 2021., pp. 406–410.
10. J. Shi, L. Zhao, X. Wang, W. Zhao, A. Hawbani, and M. Huang, "A novel deep Qlearning based air-assisted vehicular caching scheme for safe autonomous driving," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 22, no. 7, 2021., pp. 4348–4358.
11. Navarro-Ortiz, J. A survey on 5G usage scenarios and traffic models / J. Navarro-Ortiz, Pablo Romero-Díaz, Sandra Sendra et al.) // IEEE Communications Surveys & Tutorials 22.2. № 1-1. – 2020. – P. 905-929.

References

1. Cui, Y. and all. Space-Air-Ground-Integrated Network (SAGIN) for 6G⁺ Requirements, Architectures and Challenges. China Telecommunications, 2022, v.19, issue 2, pp.90-108.
2. Qiu, Junfei. Radio Resource Management for Unmanned Aerial Vehicle Assisted Wireless Communications and Networking. Diss. University of York, 2021.
3. Z. Sheng, H. D. Tuan, T. Q. Duong, and L. Hanzo, "UAV-aided two-way multi-user relaying," IEEE Transactions on Communications, vol. 69, no. 1, 2021., pp. 246–260.
4. S. Ahmed, M. Z. Chowdhury, and Y. M. Jang, "Energy-efficient UAV relaying communications to serve ground nodes," IEEE Communications Letters, vol. 24, no. 4, 2020., pp. 849–852.
5. X. Xi, X. Cao, P. Yang, J. Chen, T. Q. Quek, and D. Wu, "Network resource allocation for eMBB payload and URLLC control information communication multiplexing in a multi-UAV relay network," IEEE Transactions on

Communications, vol. 69, no. 3, 2020., pp. 1802–1817.

6. Z. Hadzi-Velkov, S. Pejoski, N. Zlatanov, and R. Schober, "UAV-assisted wireless powered relay networks with cyclical NOMA-TDMA," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 12, 2020., pp. 2088–2092,

7. B. Ji, Y. Li, D. Cao, C. Li, S. Mumtaz, and D. Wang, "Secrecy performance analysis of UAV assisted relay transmission for cognitive network with energy harvesting," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 7, 2020., pp. 7404–7415.

8. J. Yang, S. Xiao, B. Jiang, H. Song, S. Khan, and S. U. Islam, "Cache-enabled unmanned aerial vehicles for cooperative cognitive radio networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 2, 2020., pp. 155–161.

9. Y. Zhang, T. T. Liu, H. G. Zhang, and Y. A. Liu, "LEACH-R: LEACH relay with cache strategy for mobile robot swarms," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 2, 2021., pp. 406–410.

10. J. Shi, L. Zhao, X. Wang, W. Zhao, A. Hawbani, and M. Huang, "A novel deep Qlearning based air-assisted vehicular caching scheme for safe autonomous driving," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 7, 2021., pp. 4348–4358.

11. Navarro-Ortiz, J. A survey on 5G usage scenarios and traffic models / J. Navarro-Ortiz, Pablo Romero-Díaz, Sandra Sendra et al.) // *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.2. № 1-1. – 2020. – P. 905-929.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-17>

УДК 519.876.5; 621.31.33

Лишук Віктор Васильович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-4049-8467>

Мороз Сергій Анатолійович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-4677-5170>

Погинець Андрій Ярославович, студент

Кмитко Назар Олександрович, студент

Барташук Ростислав Ігорович, студент

Луцький національний технічний університет, м.Луцьк, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІНВЕРТОРА ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ

Лишук В.В., Мороз С.А., Погинець А.Я., Кмитко Н.О., Барташук Р.І. Математична модель інвертора перетворювача частоти. У статті запропоновано математичну модель інвертора перетворювача частоти. Ключовими елементами інвертора перетворювача частоти є IGBT-транзистори. В порівнянні з іншими електронними ключами вони мають більшу швидкодію та можливість виготовлення модуля з шести транзисторів та діодів. Запропонована модель перетворювача дасть змогу розуміти фізичні процеси в перетворювачах, правильно проектувати, діагностувати та експлуатувати такі пристрої. Результати розрахунків приведені графічними залежностями.

Ключові слова: математична модель, перетворювач частоти, IGBT-транзистор, інвертор, електронний ключ.

Lyshuk V.V., Moroz S.A., Pohynets' A.Ja., Kmytko N.O., Bartashchuk R.I. Mathematical model of inverter frequency converter. The article proposes a mathematical model of the frequency converter inverter. The key elements of the frequency converter inverter are IGBT transistors. Compared to other electronic keys, they have a higher speed and the possibility of manufacturing a module from six transistors and diodes. The proposed converter model will make it possible to understand physical processes in converters, to correctly design, diagnose and operate such devices. The results of the calculations are given by graphical dependencies.

Keywords: mathematical model, frequency converter, IGBT-transistor, inverter, electronic key.

Постановка наукової проблеми. Основними елементами електричної частини сучасних електротехнічних систем є напівпровідникові силові перетворювачі з комутацією електричних величин, пристрої силової електроніки, системи керування напівпровідниковими вентилями, мікропроцесорні пристрої тощо. В області електроприводу напівпровідникові перетворювачі частоти займають вагомe місце. Це пов'язано з невідступним розвитком технологій виготовлення електронних ключів, які формують необхідні характеристики електричних величин та сигналів. Перетворювачі частоти поділяють на два основні види – безпосередні перетворювачі частоти (БПЧ), що мають зв'язок з первинною мережею та дволанкові перетворювачі частоти (ДПЧ) з проміжною ланкою постійного струму. Інвертори перших побудовані на тиристорах, що мають деяку інерційність, тобто в прицевій системі рідко використовуються, а другі побудовані на транзисторах MOSFET або IGBT технологій [1,2].

Розглянемо ДПЧ з проміжною ланкою постійного струму, виконаний на IGBT-транзисторах, як такий, що має більш практичний інтерес з точки зору електроніки.

Безпосередні перетворювачі частоти отримали застосування в здебільшого для регулювання тихохідних асинхронних електроприводів середньої потужності [4]. Пов'язано це з тим, що максимальне значення вихідної частоти БПЧ становить $1/3 - 2/3$ від частоти мережі живлення. Крім цього, БПЧ мають низький коефіцієнт потужності і впливають на форму вхідного струму. Складність силових кіл і кіл керування таких перетворювачів істотно знижує область використання таких вторинних джерел електроживлення. Застосування ланки постійного струму, як вторинного джерела, виконаної на однофазному чи трифазному діодному мості, дає змогу усунути один з основних недоліків мережевих БПЧ, тобто збільшити ККД та діапазон регулювання вихідної частоти. Однак при цьому погіршуються масогабаритні показники перетворювача загалом [4].

Основними складовими елементами таких перетворювачів є випрямляч з фільтром та інвертор. Однофазна чи трифазна напруга мережі живлення спочатку випрямляється випрямлячем, згладжується фільтром, а потім інвертується, тобто перетворюється на змінну напругу необхідної частоти за допомогою інвертора.

Аналіз досліджень. Автономний інвертор напруги, що використовується у перетворювачах, показаний на рис.1, є більш застосовуваним на практиці і у ланці постійного струму містить LC-фільтр або ємність. Вхідні кола перетворювача побудовані таким чином, що режим комутації транзисторів та алгоритм їх перемикавання із застосуванням широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) не впливають на величину і форму напруги на виході інвертора. Тобто перетворювач в нашому

випадку виступає вторинним джерелом напруги з регульованою частотою [1, 4]. Але величина та форма струму на виході автономного інвертора напруги залежить від виду навантаження.

Завдяки наявності відносно великої ємності C , при роботі інвертора на активно-індуктивне навантаження, яким є асинхронний двигун (АД), забезпечується обмін реактивної енергії між двигуном і ланкою постійного струму. Для усунення пробую транзисторів в режимі цих перетоків необхідно застосувати паралельне вмикання зворотніх діодів VD . Через ці діоди протікає струм у моменти часу повернення реактивної енергії від двигуна в ємність C . LC-фільтр також забезпечує згладжування пульсацій напруги з виходу випрямляча.

Величину напруги на виході інвертора можна регулювати зміною напруги U_d у ланці постійного струму. У цьому випадку використовується керований випрямляч на тиристорах, а інвертор виконує функції комутатора фаз, формуючи необхідну частоту. Такий ПЧ називається АІН з амплітудно-імпульсною модуляцією (АІМ). Також регулювання напруги можна проводити широтно-імпульсним регулюванням (ШІР), яке здійснюється модуляцією напруги несучої частоти (частоти комутації ключів) до сигналу основної частоти. Такий ПЧ називається АІН із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). У них, як правило, випрямляч є некерованим. На сьогодні на практиці ШІМ-модуляція знайшла найбільше застосування завдяки можливості багатьох варіацій, тобто її способи підбираються конкретно під досліджувану задачу [2,3].

Як відомо в АІН відсутня рекуперація енергії від двигуна в мережу живлення. Щоб її забезпечити при генераторному (гальмівному) режимі роботи АД, встановлюється другий комплект випрямляча, який повинен бути керованим тиристорним. У генераторних режимах АД він працює як інвертор, ведений мережею. Тому автономні інвертори напруги добре зарекомендували себе лише з навантаженням активно-індуктивного характеру. Якщо ж на виході інвертора вмикається активне або активно-ємнісне навантаження, то між інвертором та навантаженням вмикаються буферні елементи з переважанням індуктивного характеру [3].

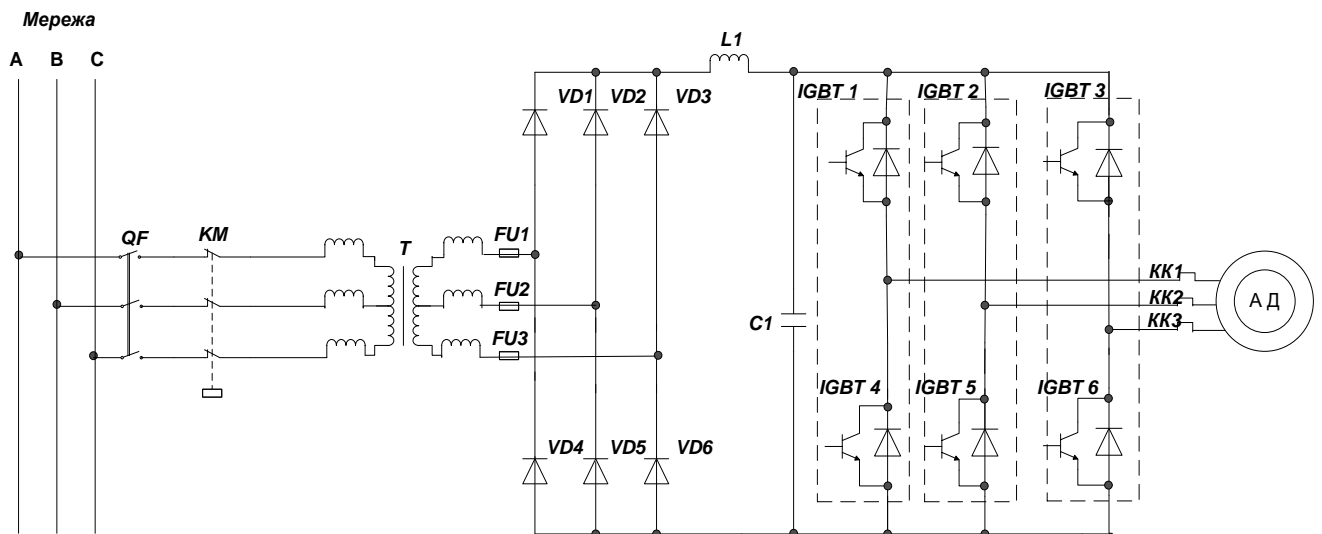


Рисунок 1 – Електрична схема системи ПЧ-АД

В даний час реалізовано безліч варіантів побудови основних кіл трифазних автономних інверторів напруг, призначених для керування швидкістю ротора електроприводів змінного струму. Ідеалізований трифазний міст складається з шести силових керованих ключів. Кожен із цих ключів повинен мати двосторонню провідність і містить у загальному випадку кілька напівпровідникових приладів, у нашому випадку транзистор та діод.

Таким чином, якщо керований елемент силового ключа знаходиться у ввімкненому стані, то відповідне плече моста має пряму високу електропровідність (проводить струм), а якщо керований елемент силового ключа знаходиться у вимкненому стані, то відповідне плече моста має зворотню нульову провідність [1, 4]. Інвертування постійної напруги джерела живлення з фільтром в трифазну змінну напругу необхідної частоти на вихідних затискачах А, В, С інвертора, що є спільною точкою кіл емітерів та колекторів відповідних плечей моста здійснюється комутацією ключів у цих плечах з певною частотою і в певній послідовності. Це встановлюється законом ШІМ-модуляції,

алгоритм якої закладений в мікроконтролері, що керує процесами в інверторі. Форма вихідної напруги в АН в основному залежить від вибраного закону комутації електронних ключів.

« Рациональним методом аналітичного дослідження електричних процесів у схемах напівпровідникових інверторів є роздільний розгляд робочих та комутаційних процесів. Робочі процеси протікають у силовій частині напівпровідникового перетворювача, їх закономірності визначаються в результаті аналізу роботи узагальненої структурної схеми інвертора на задане навантаження при прийнятному законі комутації » [4].

Комутаційні електричні процеси визначаються певними характеристиками напівпровідникових приладів, що використовуються в тій чи іншій схемі інвертора. У разі використання звичайних незапираючих тиристорів, що мають неповну керованість, слід аналізувати процеси в пристроях штучної комутації. Швидкість перебігу комутаційних процесів набагато вища у порівнянні з робочими процесами. Тому, при математичному моделюванні процесів у перетворювачах частоти, обмежуються розглядом робочих процесів при роботі ПЧ на АД.

Залежно від керування ключами в силовому колі всі інвертори поділяються на два класи: інвертори з постійною та інвертори зі змінною структурою силового кола. У першому випадку керуючі сигнали від контролера чи драйвера завжди надходять на три ключі, що зумовлює незмінність структури силової частини. У схемах другого класу число ключів, на які подаються керуючі сигнали, може бути менше трьох. Перша схема знайшла ширше застосування, завдяки кращій формі та гармонічного складу вихідної напруги.

Найпростіший спосіб керування транзисторними ключами, є спосіб з 180° -ю провідністю. У цьому випадку протягом $1/6$ періоду вихідної напруги ввімкнені три вентильні ключі: два непарних і один парний або навпаки. При такому способі цикл комутації складається із шести тактів, тривалість кожного становить 60° . Кожен ключ відкритий протягом трьох тактів або 180° . У будь-який момент часу по всіх фазах обмотки статора протікають струми, зсунуті на кут 120 ел. градусів. Часову діаграму стану електронних транзисторних ключів у такому випадку на схемі заміщення трифазного мостового інвертора напруги можна представити на рис.2.

Інтервали часу, протягом яких існує симетрична двостороння провідність відповідних плечей моста, виділені на діаграмі станів жирними горизонтальними лініями. Індекс горизонталі відповідає позначенню силового керованого ключа. Відповідно до показаної на діаграмі послідовності перемикання кожен з ключів знаходиться неперервно у ввімкненому стані протягом половини періоду вихідної частоти ($\lambda = \pi$). Протягом $1/6$ періоду вихідної напруги (60° -ти градусної зони ввімкнені три ключі: один в анодній групі вентилів, два в катодній і навпаки. Кожній комбінації станів ключів відповідає певна комбінація підключення фаз А, В і С до шин джерела живлення інвертора.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Під час розробки математичної моделі перетворювача частоти для її спрощення обмежуються математичним описом фізичних процесів тільки в силовій частині нелінійної системи. Адже напівпровідникові прилади автоматично є нелінійними, про що вказують їх вольт-амперні характеристики. Заступна схема ключових елементів інтерпретується періодично комутуваними активними опорами.

Відповідно до діаграм ввімкнення (рис.2) у кожний момент часу постійний струм протікає через дві фази навантаження та ввімкнені вентилялі. Таким чином, вихідна напруга інвертора прямопропорційно залежить від струму i_d або напруги U_d випрямляча. Визначення лінійних та фазних напруг і струмів на вихідних фазах інвертора описується за допомогою комутаційних функцій F_k [3].

$$F_k = C_i(t - t_i), \quad (1)$$

де F_k – комутаційна функція, що визначається станом k -го ключа в колі інвертора; t – час відкритого стану ключа, t_i – моменти комутації k -го ключа; C_i – значення комутаційної функції, що відповідають стану ключа у момент t_i . У моменти комутації комутаційна функція набуває значення $+1$ чи -1 .

Лінійні напруги на виході інвертора, які при з'єднанні фаз обмоток статора трикутником одночасно є і фазними напругами двигуна, можна при законі комутації представити у вигляді графіків рис.3. Тоді можна записати наступні співвідношення між напругами на виході та вході інвертора [2].

$$U_{ab} = F_{ab} \cdot U_{II}; \quad U_{bc} = F_{bc} \cdot U_{II}; \quad U_{ca} = F_{ca} \cdot U_{II}. \quad (2)$$

Тут U_n – постійна напруга на вході інвертора, а U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} – лінійні напруги на виході інвертора, F_{ab}, F_{bc}, F_{ca} – комутаційні функції лінійних напруг, що представляють собою прямокутники одиничної амплітуди в моменти, коли проводять протилежні ключі відповідних фаз і нульові ділянки, коли проводять однополярні ключі.

Графік лінійної напруги $U_n(\theta)$ описується виразом:

$$U_n(\theta) = U_{ab}(\theta) = \begin{cases} +U_n & \text{при } -0 < \theta < 2\pi/3; \\ 0 & \text{при } -2\pi/3 < \theta < \pi; \\ -U_n & \text{при } -\pi < \theta < 5\pi/3; \\ 0 & \text{при } -5\pi/3 < \theta < 2\pi. \end{cases} \quad (3)$$

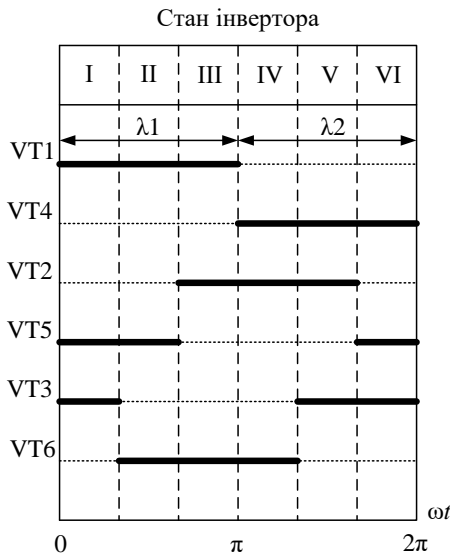


Рисунок 2 – Діаграми стану ключів інвертора

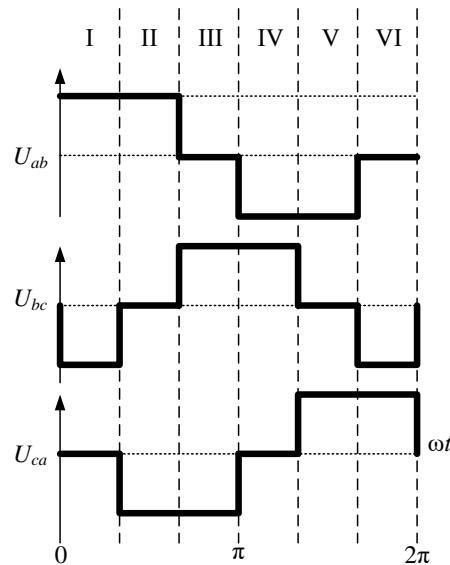


Рисунок 3 – Графіки лінійних напруг

При моделюванні автономних інверторів комутаційні функції цих фазних напруг при 180° -му керуванні можна подати у вигляді

$$F_A(\varphi) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \sin k\varphi; \quad F_B(\varphi) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \sin k\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right); \quad F_C(\varphi) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \sin k\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (4)$$

де $k = 2p + 1$ – коефіцієнт гармоніки, $p = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ – натуральний ряд чисел. Тоді комутаційні функції лінійних напруг можна визначити наступним чином

$$F_{AB}(\varphi) = F_A(\varphi) - F_B(\varphi); \quad F_{BC}(\varphi) = F_B(\varphi) - F_C(\varphi); \quad F_{CA}(\varphi) = F_C(\varphi) - F_A(\varphi). \quad (5)$$

Часові діаграми лінійних напруг автономного інвертора несинусоїдні, тому їх можна подати у вигляді суми гармонійних складових, що не містять гармонік, кратних двом і трьом [4].

$$U_n(\theta) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot U_n \left(\sin \theta' - \frac{1}{5} \sin 5\theta' - \frac{1}{7} \sin 7\theta' + \frac{1}{11} \sin 11\theta' + \dots \right) \quad (6)$$

Тут $\theta' = \theta + \pi/6$;

$U_{n1} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot U_n = 1,1U_n$ – амплітуда основної першої гармоніки лінійної напруги,

$U_{n\text{эф}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_n = 0,82U_n$ – ефективне діюче значення лінійної напруги.

Для отримання основних характеристик інвертора використовуються різні моделі, що відрізняються в основному блоками вимірювання та запису результатів вимірювання у робочий

простір MATLAB. При цьому сам інвертор, його блок живлення, керування та навантаження залишаються без змін. Модель представлена на рис.4. Параметри моделі занесено до таблиці 1.

Таблиця 1 – Параметри моделі

Бібліотека	Блок	Параметри
Powerlib-Extras/ Control Blocks	Control system – генератор сигналів ШІМ	Carrier frequency (Hz) – 1200
SimPowerSystem/ Electrical sources	U_{dc} – джерело постійної напруги	Amplitude (V) – 515
SimPowerSystem/ PowerElectronics	Universal Bridge – універсальний міст	Number of bridge arms – 3 Snubber resistance R_s (Ohm) - 100000 Power Electronik devices – IGBT/Diodes
Simulink library/ Source	Mag, Omega, (блоки constant) – джерела постійного сигналу, Clock – джерело часу	–

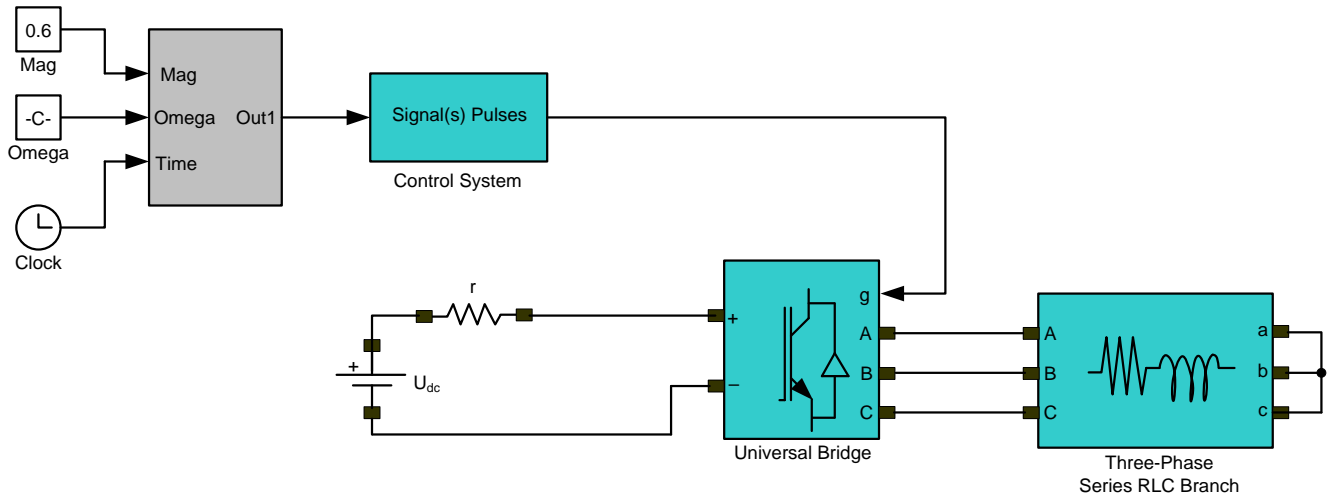


Рисунок 4 – Matlab-модель перетворювача частоти

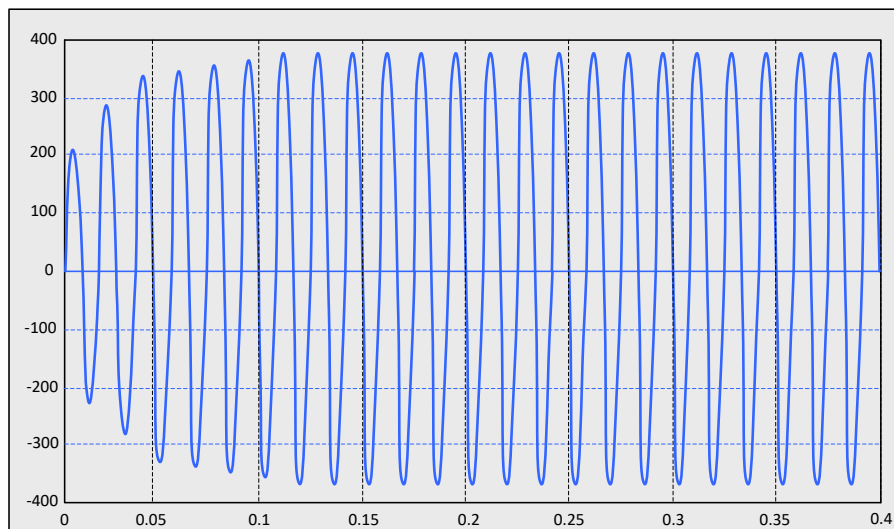


Рисунок 5 – Графік перехідного процесу лінійної напруги на виході інвертора

З рис.5 видно, що інвертор перетворювача частоти забезпечує заданий стабільний рівень напруги 380 В на кожній фазі. Така модель інвертора придатна для живлення трифазного регульованого електроприводу.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Основними перевагами математичних моделей пристроїв силової електроніки є те, що на практиці інколи неможливо провести натурний експеримент із-за дороговизни електрообладнання та інших факторів. Математична модель дає змогу з високою точністю просимулювати динамічні процеси в пристроях, проаналізувати різні режими роботи, в тому числі аварійні, і в підсумку зробити висновки про адекватність та роботоздатність моделі.

Список бібліографічного опису

1. Жуйков В.Я. Енергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами / В.Я. Жуйков, С.П. Денисюк. – К.: Текст, 2010. – 264 с.
2. Кириленко О.В. Системи силової електроніки та методи їх аналізу / О.В. Кириленко, В.Я. Жуйков, С.П. Денисюк, О.Б. Рибіна. – К.: Текст, 2006. – 488 с.
3. Махно О.О. Автономні перетворювачі. Навч. посібник / О.О. Махно, В.В. Семенов, О.В. Будьонний, Н.А. Омельчук. – Запоріжжя: ЗДІА, 2009. – 126 с.
4. Шавьолкін О. О. Енергетична електроніка: навч. посібник / О.О. Шавьолкін. – К.: КНУТД, 2017. – 396 с.

Referenses

1. Zhujkov V.Ya. Energetichni procesi v elektrichnih kolah z klyuchovimi elementami / V.Ya. Zhujkov, S.P. Denisyuk. – K.: Tekst, 2010. – 264 s.
2. Kirilenko O.V. Sistemi silovoyi elektroniki ta metodi yih analizu / O.V. Kirilenko, V.Ya. Zhujkov, S.P. Denisyuk, O.B. Ribina. – K.: Tekst, 2006. – 488 s.
3. Mahno O.O. Avtonomni peretvoryuvachi. Navch. posibnik / O.O. Mahno, V.V. Semenov, O.V. Budonnij, N.A. Omelchuk. – Zapo-rizhzhya: ZDIA, 2009. – 126 s.
4. Shavolkin O. O. Energetichna elektronika: navch. posibnik / O.O. Shavolkin. – K.: KNUTD, 2017. – 396 s.

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-18>

УДК 621.396.96

Павленко Андрій Васильович, магістр

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ СЕЛЕКЦІЇ РУХОМИХ ЦІЛЕЙ: АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

Павленко А.В. Амплітудно-частотна характеристика та ефективність системи селекції рухомих цілей: аналіз та моделювання. Ця стаття присвячена дослідженню та аналізу впливу Амплітудно-Частотної Характеристики (АЧХ) на ефективність Системи Селекції Рухомих Цілей (СРЦ) в радіолокаційних системах. Досліджено теоретичні аспекти впливу параметрів АЧХ на здатність СРЦ відсіювати непотрібні сигнали та точно виявляти рухомі об'єкти. Представлено моделювання та аналіз динаміки системи СРЦ та впливу на неї режекторних фільтрів в MatLab, що дає можливість пояснити деякі динамічні ефекти. Використано інструмент чисельного моделювання динамічних систем MatLab, з допомогою якого побудовані графіки впливу режекторних фільтрів системи СРЦ. Проведено аналітичне дослідження систем СРЦ для пояснення динамічних ефектів, що виникають.

Ключові слова: амплітудно-частотна характеристика, система селекції рухомих цілей, радіолокаційна система.

Pavlenko A.V. Amplitude-frequency characteristics and efficiency of the moving target selection system: analysis and modeling. This article is devoted to the study and analysis of the effect of the Amplitude-Frequency Characteristics (AFC) on the effectiveness of the Moving Target Selection System (TSS) in radar systems. The theoretical aspects of the influence of frequency response parameters on the ability of SRC to screen out unnecessary signals and accurately detect moving objects have been investigated. Modeling and analysis of the dynamics of the SRC system and the influence of rejection filters on it in MatLab are presented, which makes it possible to explain some dynamic effects. The tool for numerical simulation of dynamic systems MatLab was used, with the help of which the graphs of the influence of rejection filters of the SRC system were constructed. An analytical study of SRC systems was carried out to explain the dynamic effects that arise.

Keywords: amplitude-frequency characteristic, system of selection of moving targets, radar system.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями. Останнім часом дуже важливим стало швидко виявляти та знешкоджувати ворожі цілі. Для нормального функціонування системи, також важливо визначати та враховувати вплив різних факторів на її функціонування. Також не менш важливим є відрізняти фіктивні цілі від реальних, для цього потрібно враховувати інфрачервоне випромінювання, адже реагувати потрібно максимально швидко, а цілі схожі на реальні за всіма ознаками [2].

Використання результатів у авіації та в галузях проектування складних технічних систем з метою створення найбільш досконалих комплексів виявлення цілей, що мають широке застосування. [3]

Аналіз останніх досліджень, у яких започатковано вирішення проблеми. В даній статті [2] присутнє пояснення та вирішення проблеми, яку я описував вище. Для її вирішення використовується аналіз кінематики треку та зміну траєкторії потім пов'язуються сегменти треку до та після виявлення фальшивої цілі.

Ефективність перехоплювання цілі з проведеними моделюваннями, у яких враховується відстань, напрямок, швидкість цілі описані в даній роботі [4].

Методи уникнення перешкод для більш ефективного виявлення цілі описані в даній статті. Також дана стаття пропонує ефективні методи виявлення цілей враховуючи деякі фактори. [5]

Дослідження систем СРЦ. СРЦ (система селекції рухомих цілей) виконує важливу функцію виділення сигналів рухомих цілей з отриманих суміші сигналів, які містять перешкоди і шуми, інтерферуючі з ними у приймачі радіолокаційної системи (РЛС). Залежно від типу РЛС, СРЦ може мати різні задачі, такі як:

- Виявлення літаків на тлі місцевих об'єктів, хмар або інших природних та штучних перешкод (у випадку наземної РЛС).
- Виявлення низьких цілей з повітряних або космічних апаратів на тлі відбиття від поверхні Землі (у випадку бортової РЛС).
- Виявлення наземних транспортних засобів на тлі відбиття від нерухомих об'єктів і доріг (у випадку автомобільної РЛС).

Для синхронізації роботи всіх систем РЛС використовується система виміру дальності (СВД), яка генерує синхронізаційні імпульси. [7]

СРЦ також відіграє важливу роль у захисті РЛС від пасивних перешкод і відбиття від місцевих об'єктів. У системі СРЦ сигнали, що походять від перешкод, компенсуються, щоб на

© Павленко А.В.

індикаторах СІД і СП (системи позиціонування) спостерігати лише позначки від рухомих цілей. Це дозволяє забезпечити більш точне і ефективне виявлення і відстеження цілей, що рухаються у РЛС. На рисунку 1 можна побачити складові компоненти управління СРЦ.



Рисунок 1 – Клавiші управління системи СРЦ

Для захисту РЛС від впливу пасивних перешкод і відбиття від місцевих предметів, як уже було сказано раніше, застосовується система селекції цілей, що рухаються (СРЦ). [9]

Система селекції цілей, що рухаються (СРЦ), є компонентом радіолокаційних систем, який відповідає за виділення сигналів від рухомих об'єктів з загального сигнального поля, що приймається радіолокаційним приймачем. Основною метою СРЦ є виявлення, відслідковування та ідентифікація рухомих цілей на тлі статичних об'єктів, шумів та перешкод.

Характеристики СРЦ:

1. Виявлення рухомих цілей: СРЦ здатна виявляти об'єкти, що рухаються, шляхом аналізу змін в ехо-сигналах, отриманих від радіолокаційного приймача.
2. Ідентифікація цілей: СРЦ може відрізнити рухомі цілі від статичних об'єктів та перешкод, шляхом аналізу параметрів їх руху, таких як швидкість, напрямок і зміна шляху.
3. Компенсація перешкод: СРЦ може використовувати алгоритми компенсації, які дозволяють виділити сигнали від рухомих цілей, компенсуючи ехо-сигнали від статичних об'єктів та перешкод.
4. Висока реакційність: СРЦ має високу швидкість реагування, що дозволяє швидко виявляти і відслідковувати рухомі цілі.

Переваги СРЦ:

- Забезпечує високу ефективність виявлення та відслідковування рухомих цілей.
- Допомогає уникнути помилкового виявлення статичних об'єктів та перешкод як цілей.
- Забезпечує збільшену надійність та точність визначення параметрів руху цілей.

Недоліки СРЦ:

- Вразливість до інтенсивних перешкод або сильного шуму, які можуть призвести до помилкового виявлення або втрати цілей.
- Обмежена можливість ідентифікації деяких типів рухомих цілей, особливо у випадках, коли вони мають низьку радіолокаційну сигнатуру.

Використання СРЦ:

- Авіаційна промисловість: СРЦ використовується для наведення літаків на цілі, виявлення повітряних цілей на фоні інших об'єктів та перешкод.
- Військові додатки: СРЦ застосовується для виявлення та відслідковування ворожих об'єктів, забезпечення безпеки в зоні радіолокаційного контролю.
- Автоматизовані системи безпеки: СРЦ може бути використана для виявлення рухомих цілей у системах контролю безпеки, наприклад, в системах відеоспостереження та системах раннього виявлення зіткнень на дорогах.

Застосування СРЦ залежить від конкретного контексту і вимог системи, де вона використовується. [1]

Алгоритм роботи системи селекції цілей, що рухаються (СРЦ), може включати наступні кроки:

1. Вхідний сигнал: СРЦ отримує вхідний сигнал від радіолокаційного приймача, який містить інформацію про ехо-сигнали, отримані від об'єктів у радіолокаційному полі.
2. Фільтрація і попереднє оброблення: Вхідний сигнал може бути підданий фільтрації і попередньому обробленню для виділення сигналів від рухомих цілей та приглушення шуму та перешкод.
3. Виявлення цілей: СРЦ використовує алгоритми виявлення, які аналізують відфільтрований сигнал для виявлення змін в ехо-сигналах, що свідчать про наявність рухомих цілей.
4. Відслідковування цілей: Якщо цілі виявлені, СРЦ застосовує алгоритми відслідковування для визначення параметрів руху цілей, таких як швидкість, напрямок і траєкторія.
5. Ідентифікація цілей: СРЦ може використовувати алгоритми ідентифікації, які дозволяють відрізнити цілі від статичних об'єктів та перешкод шляхом аналізу їхнього руху та інших характеристик.
6. Компенсація перешкод: Якщо виявлено перешкоди або статичні об'єкти, СРЦ може застосувати алгоритми компенсації, які дозволяють виділити сигнали від рухомих цілей, компенсуючи ехо-сигнали від перешкод.
7. Відображення результатів: Результати роботи СРЦ можуть бути відображені на індикаторах або передані до інших систем для подальшого аналізу та використання.

Характеристики СРЦ:

- Ефективність: СРЦ здатна ефективно виявляти та відслідковувати рухомі цілі навіть у високошумлених та перешкоджених середовищах.
- Швидкодія: СРЦ може працювати в режимі реального часу, забезпечуючи оперативну обробку та відображення інформації про рухомі цілі.
- Адаптивність: СРЦ може адаптуватися до змінних умов роботи та варіацій в радіолокаційному середовищі.
- Мінімальне втручання оператора: СРЦ здатна автоматично виявляти та відслідковувати цілі без значного втручання оператора.

Потрібно також пояснити відмінність основних термінів, які будуть зустрічатися в даній роботі. СРЦ (система селекції рухомих цілей) і СДЗ (система дистанційного зондування) - це різні терміни, які використовуються в різних контекстах і мають різні значення. Давайте розглянемо їх відмінності:

СРЦ (система селекції рухомих цілей):

- СРЦ використовується в контексті військових або авіаційних систем.
- Її основна функція - виявлення, відстеження та вибір рухомих цілей (наприклад, літаків, суден, ракет).
- СРЦ координує рух об'єктів, визначає їх місцезнаходження, відстежує їх рух і надає інформацію пілотам або операторам системи для подальшої обробки та виконання завдань.

СДЗ (система дистанційного зондування):

- СДЗ використовується в контексті дистанційного зондування Землі.
- Її основна функція - збір і аналіз даних, отриманих з дистанції від Землі (наприклад, за допомогою супутників або літальних апаратів).
- СДЗ дозволяє отримувати інформацію про різні параметри Землі, такі як клімат, поверхневі утворення, рельєф, водні ресурси, рослинність і т.д.

Отже, відмінність між СРЦ і СДЗ полягає у їх призначенні, контексті використання і цілях. СРЦ використовується для виявлення і вибору рухомих цілей у військових або авіаційних системах, тоді як СДЗ використовується для збору даних із дистанції для аналізу параметрів Землі.

Тумблер АМПЛ-СРЦ" (Тумблер Амплітуди Сигналу Системи селекції Рухомих Цілей) використовується для переключення станції (або системи) в режим СРЦ і активації режиму ВОБУЛЯЦІЇ (або вобулювання).

Система Дистанційного Зондування (СРЦ) використовується для виявлення об'єктів або перешкод на основі відображеного сигналу (відбитого від об'єкта) і його аналізу. Це може бути використано, наприклад, в радіолокаційних або радіолокаційно-навігаційних системах.

Режим ВОБУЛЯЦІЇ (вобулювання) включається, коли на індикаторах пошуку та дальності з'являються пасивні перешкоди (наприклад, ворожі радіолокаційні сигнали). В цьому режимі станція перестає активно вислати сигнал і переходить у пасивний режим спостереження та аналізу отриманих сигналів.

У режимі СРЦ включається режим вобуляції, який дозволяє оператору відокремити сигнали від рухомих цілей від суміші сигналів, що містять перешкоди. Оператор дальності, спостерігаючи на індикаторі перешкод, може коригувати положення ручки "ЧАСТОТА КОМПЕНСАЦІЇ" з метою досягнення повного зникнення перешкоди або максимального зменшення її щільності.

Таким чином, режим СРЦ з використанням вобуляції та регулюванням частоти компенсації дозволяє оператору ефективно управляти сигналами від рухомих цілей та зменшити вплив пасивних перешкод на роботу РЛС. На рисунках 2 і 3 можна побачити пасивні перешкоди.



Рисунок 2 – Вид пасивної перешкоди на екрані ПП до компенсації



Рисунок 3 – Вид пасивної перешкоди на екрані ПП після її компенсації

Система вторинних джерел живлення та система вентиляції відповідають за забезпечення роботи всіх вузлів та блоків радіолокаційної станції (РЛС). Вони забезпечують необхідну енергію для функціонування системи та відведення тепла, що виникає під час роботи.

Результатом роботи РЛС є визначення поточних координат повітряної цілі, таких як дальність (Д), азимут і кут місця (ϵ). Ці дані потім передаються до управлінсько-розподільного пункту (УРП) для подальшої обробки та використання.

Режими роботи РЛС включають:

1. Ручний пошук мети: Оператор вручну виконує пошук цілей на індикаторах РЛС та наводить антену на ціль.
2. Секторний пошук мети (СЕКТОРНИЙ ПОШУК): РЛС автоматично сканує певний сектор простору для виявлення цілей.
3. Круговий пошук мети (КРУГОВИЙ ПОШУК): РЛС виконує повний оберт антени навколо своєї вертикальної осі для виявлення цілей у всіх напрямках.

4. Ручне наведення антени на ціль (НАВЕДЕННЯ): Оператор вручну наводить антену на ціль після виявлення.
5. Автоматичний супровід мети (АВТОМАТ): РЛС автоматично відстежує рух цілі після її виявлення і підтримує постійний зв'язок з нею.

Режими РЛС також можна поділити за способом обробки відлуння-сигналів на амплітудний і селекцію цілей, що рухаються (СРЦ). Режим СРЦ застосовується під час роботи в умовах пасивних перешкод, де важливим завданням є виділення сигналів рухомих цілей зі суміші перешкод та шумів, які приймаються приймачем РЛС.

Використання режиму СРЦ дозволяє покращити ефективність виявлення рухомих цілей та забезпечити більш точну інформацію про їх рух. Однак, цей режим може мати обмеження в виявленні дуже малих або швидких цілей, особливо в умовах великого шумового фону або наявності сильних перешкод

1.2 Розрахунок потужності відображення. При виявленні рухомих цілей у режимі СДЦ використовується доплерівський ефект, який полягає в зміщенні частоти несучого коливання сигналу відносно РЛС через рух цілі відносно станції. За умови одночасного прийому сигналів від рухомих цілей і пасивних перешкод, завдання СДЦ стає складнішим через велику потужність відображень від нерухомих об'єктів у малорухомих цілях (потужність пасивних перешкод), яка перевищує потужність сигналів рухомих цілей на 20-80 дБ і більше. Одним з основних критеріїв для розрізнення сигналів рухомих і нерухомих об'єктів є доплерівське зміщення частоти f несучого коливання. При наближенні або віддаленні рухомої цілі від РЛС, спостерігається зсув частоти сигналу. Цей доплерівський зсув може служити ознакою рухомості цілі та використовується для відрізнєння сигналів рухомих цілей від пасивних перешкод. Враховуючи велику різницю в спектрах сигналів і перешкод, СДЦ може вирішити завдання виявлення рухомих цілей лише при наявності достатньо виражених відмінностей між ними. Хоча СДЦ має свої обмеження і не завжди може ефективно розрізняти сигнали рухомих цілей і пасивних перешкод, вона все ж є важливим елементом системи виявлення та селекції цілей, що рухаються, допомагаючи покращити точність інформації про рухомі об'єкти в умовах перешкод та шуму.

Основою для розрізнення сигналів рухомих та нерухомих об'єктів, є доплерівське зміщення частоти f несучого коливання, при відображенні радіосигналу від цілі, що наближається або віддаляється по відношенню до РЛС (1) :

$$f_{\delta} = \frac{2V_r}{c} f_0 = \frac{2V_r}{\lambda}, \quad (1)$$

де V_r - радіальна швидкість мети відносно РЛС; f - несуча частота; λ - довжина хвилі РЛС; c - швидкість поширення радіохвилі.

На рисунку 4 зображено вигляд спектрів для виявлення пасивних перешкод.

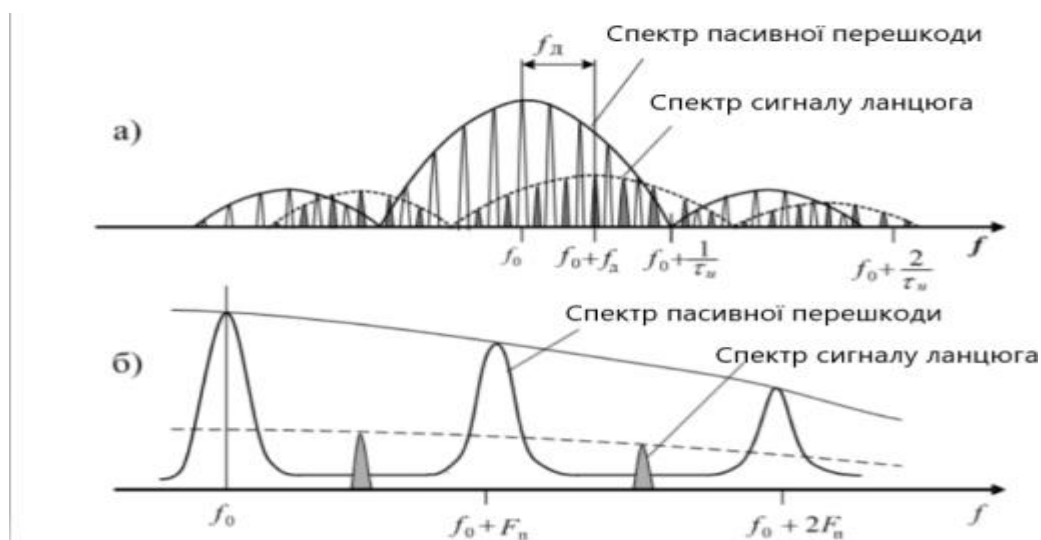


Рисунок 4а — загальний вигляд спектрів пасивної перешкоди і сигналу відбитого рухомою цілю для когерентних імпульсних РЛС з низькою частотою повторення зондуючих імпульсів F_p .

Рисунок 4б — фрагмент спектру.

Відбитий сигнал від рухомої цілі має певні зміни у порівнянні зі звичайним сигналом в радіолокаційних системах. При рухомій цілі імпульс сигналу зазнає деякої зміни, яка пов'язана зі швидкістю руху цілі.

1. **Частота несучої (доплерівський зсув частоти):** Частота сигналу, відбитого від рухомої цілі, змінюється на величину $(1 + 2vr/c)$, де v - швидкість цілі, c - швидкість світла. Це явище називається доплерівським зсувом частоти.

2. **Частота повторення (доплерівська зміна частоти повторення):** Частота повторення сигналу також змінюється у величину $(1 + 2vr/c)$. Це пов'язано зі зміною часу між імпульсами, відбитими від рухомої цілі.

3. **Тривалість імпульсу:** Тривалість імпульсу змінюється на зворотний коефіцієнт $(1 + 2vr/c)$. Це означає, що тривалість імпульсу відбитого сигналу від рухомої цілі буде коротшою порівняно з тривалістю імпульсу від нерухомої цілі.

Згідно з цим, для виявлення сигналів рухомої цілі можна використовувати будь-яку зміну з цих трьох параметрів: частоти несучої, частоти повторення або тривалості імпульсу. Це дозволяє системам радіолокації ефективно виявляти і визначати рухомі цілі в умовах змін.

У імпульсних РЛС, високочастотні коливання випромінюються під час тривалості зондуючого імпульсу. В решті періоду повторення ($T_p - t_i$) ці коливання відсутні, і опорні коливання, необхідні для виявлення доплерівського збільшення частоти прийнятих імпульсів, створюються в системах СРЦ когерентним гетеродином. Ці системи називаються когерентно-імпульсними системами СДЦ з внутрішньою когерентністю. У системах СРЦ з зовнішньою когерентністю в якості опорних використовуються високочастотні коливання сигналів, відбитих від нерухомих об'єктів, розташованих в межах елемента дозволу (дозволеного об'єму), де знаходиться рухома ціль.[8]

Системи селекції рухомих цілей залежно від частоти повторення зондуючих імпульсів можуть бути розділені на різні типи:

- РЛС з низькою частотою повторення ($F_p < 50$ кГц);
- РЛС з високою частотою повторення ($F_p > 50$ кГц), також називають імпульсно-доплерівськими або квазінеперервними;
- РЛС з середньою частотою повторення (5 кГц $< F_p < 50$ кГц).

РЛС з низькою частотою повторення імпульсів мають великий інтервал однозначного вимірювання відстані та малий інтервал однозначного вимірювання швидкості. Імпульсно-доплерівські РЛС, навпаки, дозволяють вимірювати відстань в великому діапазоні, але мають малий інтервал однозначного вимірювання відстані (5 - 10 каналів). РЛС з середньою частотою повторення імпульсів не забезпечують однозначний вимір швидкості та відстані, але спільне використання декількох близьких середніх частот повторення дозволяє розширити ці діапазони.

Сучасні РЛС з системами селекції рухомих цілей можуть працювати з різними частотами повторення імпульсів, що дозволяє покращити ефективність виявлення і вимірювання рухомих цілей.

Синтез безперіодного компенсатора першого та другого порядку.

Синтез безперіодного компенсатора першого та другого порядку використовується для піддавання приглушенню пасивних перешкод. Простим інструментом при цьому є безперіодний компенсатор (ЧПК), який здійснює віднімання сигналу на основі періодичності. В даному методі, відбиті сигнали, що отримуються протягом поточного періоду повторення, віднімаються від сигналів, які були затримані на час t_z , що дорівнює періоду повторення ТП.

Зазначений процес демонструє наступну концепцію: сигнали, які відбиваються від нерухомих об'єктів, залишаються практично незмінними між періодами повторення. Проте сигнали, відбиті від рухомих цілей, зазнають зсуву у часі між періодами повторення через їхню швидкість.

У ЧПК з використанням лінії затримки, відбиті сигнали з періоду повторення ТП затримуються на час $t_z = TP$. При відніманні цих затриманих сигналів від відбитих сигналів поточного періоду повторення, ефективно підсилюється різниця між нерухомими та рухомими об'єктами. Таким чином, ЧПК дозволяє виділити рухомі об'єкти за рахунок виключення статичних сигналів, які залишаються майже незмінними між періодами повторення.

Синтез ЧПК може бути здійснений першим та другим порядком, відповідно до складності обчислень та точності, яку ви хочете досягти (рисунок 5).

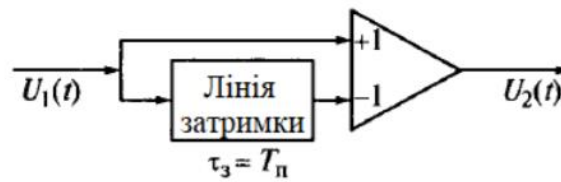


Рисунок 5 — Структурна схема черезперіодного компенсатора

Структурна схема черезперіодного компенсатора (ЧПК) включає компенсацію статичних амплітуд сигналів, що залишаються незмінними протягом періоду повторення, і розділення динамічних сигналів рухомих об'єктів. Ця схема використовує доплерівську частоту Fv для визначення різниці в фазі між рухомими та нерухомими об'єктами.

У цій схемі амплітуди статичних сигналів, які залишаються постійними, компенсуються, а сигнали від рухомих об'єктів, амплітуда яких змінюється з доплерівською частотою [6], з'єднуються на вході компенсуючого пристрою. В результаті на виході ЧПК отримуємо різницю амплітуд, яка визначається набігом фази за період повторення:

$$\Delta\varphi = 2\pi FvT\Pi \tag{2}$$

Ця різниця амплітуд використовується для подальшого аналізу та ідентифікації рухомих об'єктів у радіолокаційних системах (рис.6).

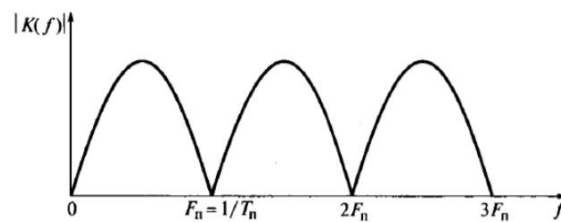


Рисунок 6 – Амплітудно частотна характеристика ЧПК

Цей черезперіодний компенсатор (ЧПК) можна розглядати як гребінчастий фільтр подавлення. Його функцію передачі можна записати у вигляді:

$$K(f) = 1 - e^{(-j2\pi fT\Pi)} \tag{3}$$

Після множення та ділення цього виразу на $2e^{(-j\pi fT\Pi)}$, отримуємо (4):

$$K(f) = 2e^{(-j\pi fT\Pi)} e^{(j\pi fT\Pi)} - e^{(-j\pi fT\Pi)} 2j = 2je^{(-j\pi fT\Pi)} \sin(\pi fT\Pi). \tag{4}$$

Модуль функції передачі $|K(f)|$, який представляє амплітудно-частотну характеристику фільтру подавлення (5), визначається як:

$$\begin{aligned} |K(f)| &= 2|\sin(\pi fT\Pi)|, \\ \text{де } |je^{(-j\pi fT\Pi)}| &= 1. \end{aligned} \tag{5}$$

Ця амплітудно-частотна характеристика дорівнює нулю на частотах, кратних $F\Pi = 1/T\Pi$. Це означає, що відбиті сигнали від нерухомих об'єктів будуть повністю приглушені, оскільки їх спектри мають лінії на цих частотах.

З цієї формули видно, що якщо сигнал від рухомої цілі має доплерівське зміщення частоти $Fv = 2vr/\lambda$, то він також буде приглушений фільтром. Це стає можливим завдяки тому, що швидкості цілей, рівні $v_{сл} = nF\Pi\lambda/2$, стають "сліпими" для фільтра. Оптимальними умовами спостереження рухомої цілі є ті, де радіальні швидкості цілі, рівні $v_{опт} = (2n + 1)/(4 F\Pi\lambda)$, є оптимальними.

Проектування системи для аналізу режекторного фільтру

В системі було проведення реалізація ряду функцій таких, як керування рухом повзунка, обчислення АЧХ режекторного фільтру, а також були реалізовані функції збереження графіка та відображення його на екрані монітора.

Готова система має вигляд (рисунок 7).

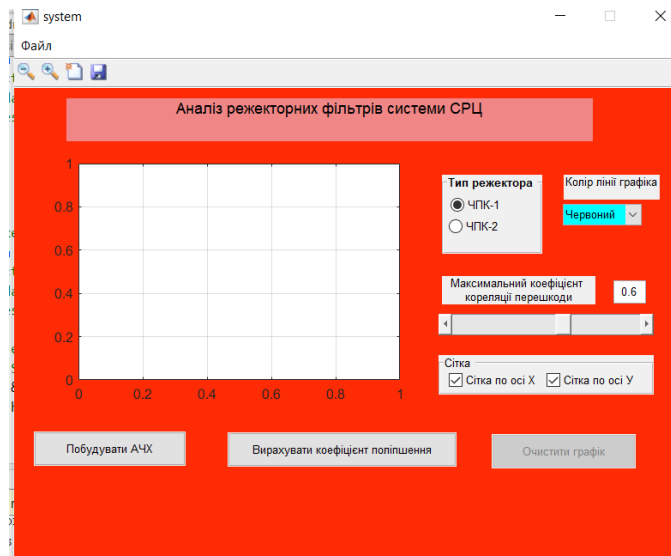


Рисунок 7 – Вигляд системи

У наведеному дослідженні буде проводитись побудова АЧХ (амплітудно — частотної характеристики).

При виборі ЧПК - 2 та коефіцієнту кореляції 0,7, система має вигляд. Колір відтворення графіка лінії можна змінювати (червоний, синій, зелений) (рис.8).

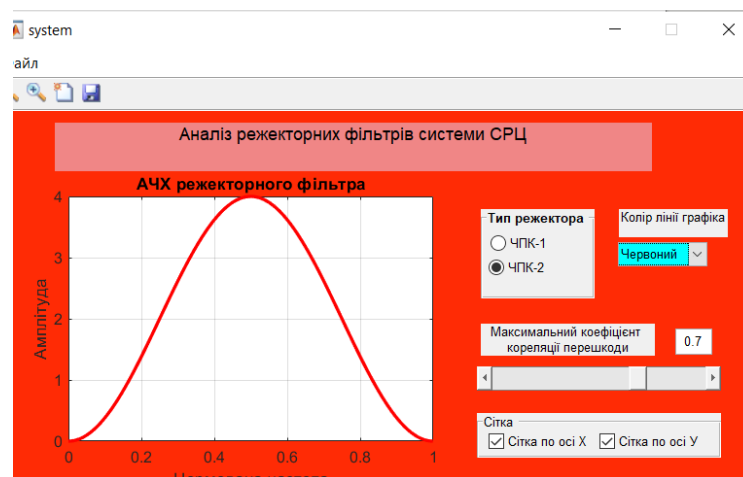


Рисунок 8 – Моделювання функції за вказаних умов

При виборі режиму Вирахування коефіцієнта поліпшення Моделювання графіка відображається в системі з коефіцієнтом поліпшення та коефіцієнтом міжперіодної кореляції. Для моделювання вказуємо коефіцієнт кореляції 0,93, ЧПК-1 (рис. 9).

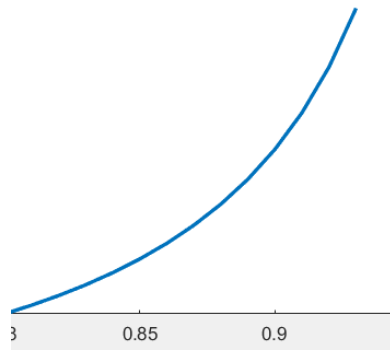


Рисунок 9 — Наведений графік при виборі відповідних умов

Реалізована функція збереження графіка та відкриття його в окремому файлі (рис. 10).

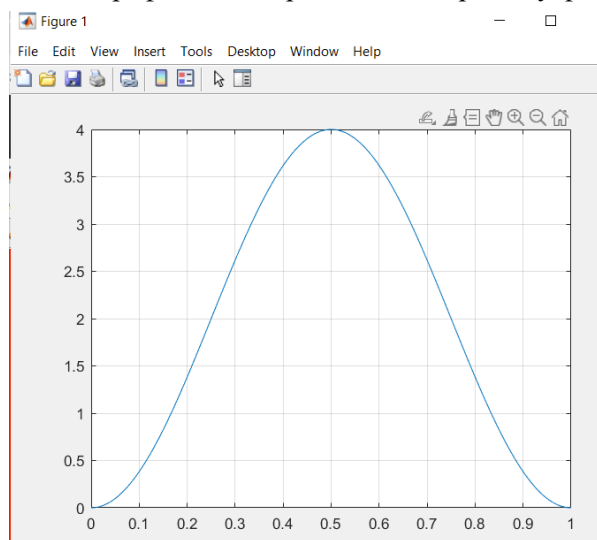


Рисунок 10— Реалізація функції зберігання та відкриття файлу

Висновок. При написанні роботи був проаналізований вплив різних факторів на систему селекції рухомих цілей, а саме який вплив на систему має режекторний фільтр. Власне основне призначення даного фільтра полягає в не пропусканні частот вказаного діапазону та в пропусканні частот всіх інших діапазонів.

Для моделювання впливу я вибрав АЧХ, адже вона показує залежність вихідного сигналу або системи від частоти вхідного сигналу.

Моделювання відбувалося в двох режимах ЧПК-1 та ЧПК-2 та вказуванням відповідного коефіцієнта кореляції перешкоди.

При моделюванні систем стало зрозуміло, який вплив має режекторний фільтр на СРЦ.

Список бібліографічного опису

1. Юрковський Я. М. Удосконалення системи селекції рухомих цілей в сучасних радіолокаційних засобах контролю повітряного простору/ Я.М. Юрковський// Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи: міжнар. наук.- техн. конф. 18–24лист. 2019р.: тези доп. — Київ, 2019. — С. 189–191 (date of access: 19.08.2023).
2. Track Segment Association in Target Selection for Interdiction Using a Single Passive Sensor / K. Yang et al. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2021. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/taes.2021.3087813> (date of access: 18.08.2023).
3. Wang L., Wu B., Sun L. System Design Research on Airborne Radar of Wide Area GMTI Mode for Fopen Moving Target. *2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, Xiamen, China, 26–29 November 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/apsar46974.2019.9048425> (date of access: 19.08.2023).
4. Dynamic Task Allocation Algorithm for Moving Targets Interception / D. Zhao et al. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2022. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1109/tsmc.2022.3189479> (date of access: 18.08.2023).

5. A Novel Moving Target Detection Method Based on RPCA for SAR Systems / Y. Guo et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2020. Vol. 58, no. 9. P. 6677–6690. URL: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2020.2978496> (date of access: 19.08.2023).
6. Doppler Centroid Estimation for Ground Moving Target in Multichannel HRWS SAR System / Z. Zhang et al. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2021. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/lgrs.2021.3068403> (date of access: 20.08.2023).
7. Основні характеристики системи селекції рухомих цілей (СПЦ). *ni.biz.ua*. URL: http://ni.biz.ua/16/16_2/16_20475_osnovni-harakteristiki-sistemi-selektcii-ruhomih-tsiley-srts.html (дата звернення: 19.08.2023).
8. Основи радіолокації. *Grundlagen der Radartechnik*. URL: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp07.uk.html> (дата звернення: 20.08.2023).
9. СЕЛЕКЦІЯ рухомих цілей (СДЦ). *um.co.ua*. URL: <http://um.co.ua/8/8-2/8-28909.html> (дата звернення: 20.08.2023).

References

1. Track Segment Association in Target Selection for Interdiction Using a Single Passive Sensor / K. Yang et al. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2021. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/taes.2021.3087813> (date of access: 18.08.2023).
2. Wang L., Wu B., Sun L. System Design Research on Airborne Radar of Wide Area GMTI Mode for Fopen Moving Target. *2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, Xiamen, China, 26–29 November 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/apsar46974.2019.9048425> (date of access: 19.08.2023).
3. Dynamic Task Allocation Algorithm for Moving Targets Interception / D. Zhao et al. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2022. P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1109/tsmc.2022.3189479> (date of access: 18.08.2023).
4. A Novel Moving Target Detection Method Based on RPCA for SAR Systems / Y. Guo et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2020. Vol. 58, no. 9. P. 6677–6690. URL: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2020.2978496> (date of access: 19.08.2023).
5. Doppler Centroid Estimation for Ground Moving Target in Multichannel HRWS SAR System / Z. Zhang et al. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2021. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/lgrs.2021.3068403> (date of access: 20.08.2023).

CONTENTS

AUTOMATION AND MANAGEMENT	
Kahan I., Kostyuchko S. CRM systems as a tool for improving business efficiency	5
Lavrov E.A., Chybiriak Ya. I., Siryk O. E., Velykodnyi D. V., Borovyk V. O. An approach to building automated expert assessment systems to support strategic and tactical decision-making	10
Roman V., Iliuchok V. Software for designing of multipath ultrasonic flow meters	24
Chybiriak Y. I., Zakharova A. M., Lavrov E. A., Velykodnyi D. V., Borovyk V. O. Models for automated search for rational assembly options for mechanical engineering products	32
INFORMATICS AND COMPUTER SCIENCE	
Dymova H. Dynamic Operator Extraction Method	43
Kaliuta K. Personalizing the user experience in Salesforce using AI technologies	48
Krulikovskyi B., Nazaruk V., Reinska V. Development of the mathematical apparatus of Boolean derivatives to improve the reliability and validity of information processing	54
Hryhoriev Yu.O. Extreme problem for operator with two kernels in spaces of generalized functions	60
Husak L.P., Levchuk O.V., Hrynychuk T.P. The value of computer mathematics in the formation of digital competences for future economists	71
Ivanenko A.R., Marchenko O.I. Method of compilation union types of TypeScript into Common Intermediate Language of .NET platform	77
Pavlenko A.V., Kostiuchko S.M. Detection and analysis of the most vulnerable places of web resources	85

Polishchuk M.M., Semenyuk O.V., Polishchuk L.O., Lomakin M.V. Possibilities of authorization and protection of user data during the development of cloud web applications for IoT	94
Prozur Vitalii. Analysis of types of generative competitive networks	104
Skilkov N.V. Study of time characteristics of subtasks in real-time multiprocessor systems	111
Yaroshenko O. Method of analysis of emotional coloring of texts using graph convolutional neural networks	119
TELECOMMUNICATIONS AND RADIO ENGINEERING	
Vasylkivskiy M.V., Prykmeta A.V., Oliinyk A.O., Ksondz N.O. Optimization of software-configurable flying access networks.	128
Lyshuk V.V., Moroz S.A., Pohynets' A.Ja., Kmytko N.O., Bartashchuk R.I. Mathematical model of inverter frequency converter	140
Pavlenko A.V. Amplitude-frequency characteristics and efficiency of the moving target selection system: analysis and modeling	146

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 невіршених 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 Суг 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 Суг розміром 9 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині, 200 слів. Нижче анотацій обов'язково вказуються **ключові слова**.
- **Основний текст** розміщується на через 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 Суг; 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 БЕЗПЛОТНИХ 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.

.....

Аналіз досліджень.

.....

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

.....

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

.....

Times New Roman 11

Список бібліографічного опису

1. Сін Лю, Ціньян Сяо, Віджай Гопалакришнан, Маттео Варвелло (2017) Дослідження 360 ° Інновації для панорамного відеопотоку, С. 50-55. АСМ.
2. Б. Хань, Ф., Цянь, Л. Джі та В. Гопалакришнан. (2017) MP-DASH: Адаптивна відео-трансляція через перевагу, орієнтовану на багатofункціональність. У матеріалах 12-ї Міжнародної конференції з нових мережевих експериментів та технологій, С. 129–143. АСМ.

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,

Times New Roman 9

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 13.09.2023. 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

Свідоцтво Держкомтелерадіо України ДК №4123 від 28.07.2011 р.
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75, тел.: (0332) 74-61-02