

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних наук
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Алгоритмічні засоби периферійних обчислень для обробки великих даних розумних міст

Виконав: студент IV курсу, групи СН-41

спеціальності 122 Комп'ютерні науки
(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Білянський А.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Никитюк В.В.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Липак Г.І.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Боднарчук І.О.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)
Кафедра комп'ютерних наук
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Боднарчук І.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« 8 » червня 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки
(шифр і назва спеціальності)
Студенту Білянському Артему Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Алгоритмічні засоби периферійних обчислень для обробки великих даних розумних міст

Керівник роботи Никитюк Вячеслав Вячеславович., к.т.н., доцент кафедри КН
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 14 » травня 2026 року № 4/7-239

2. Термін подання студентом завершеної роботи 23 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації щодо розумних міст, міських наборів та колекцій великих даних та алгоритмічних засобів периферійних обчислень для їх обробки.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ. 1. Теоретико-методологічні засади та архітектурно-алгоритмічні принципи периферійної обробки даних у «розумних містах». 2. Аналітичний огляд та класифікація алгоритмічних засобів оптимізації периферійних обчислень у «розумних містах». 3. Алгоритми та моделі багатокритеріальної оптимізації периферійних обчислювальних процесів у «розумних містах». 4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці. Висновки. Перелік джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
1. Титульна сторінка. 2. Тема та мета дослідження. 3. Завдання дослідження. 4. Актуальність дослідження. 5. Класифікація критично важливих застосунків «розумних міст». 6. Таблиця класифікації критично-важливих застосунків «розумних міст». 7. Аналіз архітектурних характеристик периферійних обчислювальних платформ. 8. Таксономія «розумного міста». 9. Алгоритмічні засоби периферійних обчислювальних платформ «розумних міст». 10. Параметри оптимізації та критерії обмежень периферійних обчислень у системах «розумного міста». 11. Взаємозв'язок та компромісні співвідношення між ключовими критеріями оптимізації периферійних систем «розумних міст». 12. Висновки. 13. Завершальний слайд.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Гурик О.Я., доцент каф. МТ		

7. Дата видачі завдання 26 січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	26.01.2026	
2.	Підбір та опрацювання літературних джерел по темі кваліфікаційної роботи	27.01.2026-16.01.2026	
3.	Виконання дослідження алгоритмічних засобів периферійних обчислень для обробки великих даних «розумних міст»	17.01.2026-10.05.2026	
4.	Оформлення розділу «Теоретико-методологічні засади та архітектурно-алгоритмічні принципи периферійної обробки даних у «розумних містах»»	11.05.2026-17.05.2026	
5.	Оформлення розділу «Аналітичний огляд та класифікація алгоритмічних засобів оптимізації периферійних обчислень у «розумних містах»»	18.05.2026-24.05.2026	
6.	Оформлення розділу «Алгоритми та моделі багатокритеріальної оптимізації периферійних обчислювальних процесів у «розумних містах»»	25.05.2026-31.05.2026	
7.	Виконання завдання до підрозділу «Безпека життєдіяльності»	01.06.2026-08.06.2026	
8.	Виконання завдання до підрозділу «Основи охорони праці»	01.06.2026-08.06.2026	
9.	Оформлення кваліфікаційної роботи	09.06.2026-11.06.2026	
10.	Нормоконтроль	12.06.2026-15.06.2026	
11.	Перевірка на плагіат	16.06.2026	
12.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	18.06.2026	
13.	Захист кваліфікаційної роботи	22.06.2026	

Студент

(підпис)

Білянський А.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Никитюк В.В.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Алгоритмічні засоби периферійних обчислень для обробки великих даних розумних міст // Кваліфікаційна робота освітнього рівня «Бакалавр» // Білянський Артем Андрійович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії, кафедра комп'ютерних наук, група СН-41 // Тернопіль, 2026 // С.74, рис. – 3, табл. – 21, кресл. – 13, додат. – 0, бібліогр. – 64

Ключові слова: периферійні обчислення, розумне місто, великі дані, алгоритмічні засоби, багатокритеріальна оптимізація, розподіл ресурсів, відмовостійкість, енергоефективність.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню алгоритмічних засобів периферійних обчислень для обробки великих даних розумних міст. В першому розділі кваліфікаційної роботи розглянуто периферійні обчислення. Проведено систематизацію алгоритмічних засобів розподілу ресурсів. Проаналізовано архітектурні характеристики обчислювальних платформ. Подано структурно-порівняльний аналіз парадигм і моделей розвантаження. Висвітлено теоретичні засади та концептуальні основи периферійних обчислень. Досліджено критично важливі застосунки. В другому розділі досліджено алгоритми енергоефективного управління ресурсами. Проаналізовано алгоритмічні засоби мінімізації затримок обробки великих даних периферійних мережах «розумного міста». Здійснено аналіз методів забезпечення надійності та відмовостійкості. Розглянуто математичні моделі та алгоритмічні засоби багатокритеріальної оптимізації інфраструктури. Досліджено алгоритмічні засоби інтелектуального керування ресурсами периферійних систем. В третьому розділі досліджено математичні моделі та алгоритми динамічного планування завдань. Здійснено класифікацію та аналіз математичних методів багатокритеріальної оптимізації. Проведено систематизацію дослідницьких прогалін та визначення напрямків оптимізації периферійних обчислень «розумного міста». Розглянуто алгоритмічні засоби багатокритеріальної оптимізації.

ANNOTATION

Algorithmic Tools for Edge Computing in Big Data Processing for Smart Cities // Qualification work of the educational level «Bachelor» // Artem Bilianskyi // Ternopil Ivan Pulyu National Technical University, Computer and Information Systems and Software Engineering Faculty, Computer Sciences Department, group SN-41 // Ternopil, 2026 // P. 74, fig. – 3, tabl. – 21, chair. – 13, annexes. – 0, references – 64.

Keywords: edge computing, smart city, big data, algorithmic tools, multi-criteria optimization, resource allocation, fault tolerance, energy efficiency.

The qualification thesis is devoted to the study of algorithmic tools for edge computing in big data processing for smart cities. The first chapter examines edge computing paradigm. The systematization of algorithmic tools for resource allocation is carried out. The architectural characteristics of computing platforms are analyzed. A structural and comparative analysis of offloading paradigms and models is presented. The theoretical foundations and conceptual frameworks of edge computing are highlighted. Mission-critical applications are investigated. The second chapter explores algorithms for energy-efficient resource management. Algorithmic tools for minimizing big data processing latencies in edge networks of a "smart city" are analyzed. An analysis of methods for ensuring reliability and fault tolerance is carried out. Mathematical models and algorithmic tools for multi-objective infrastructure optimization are considered. Algorithmic tools for intelligent resource management in edge systems are investigated. The third chapter investigates mathematical models and algorithms for dynamic task scheduling. The classification and analysis of mathematical methods for multi-objective optimization are performed. The systematization of research gaps and the determination of trends for optimizing edge computing in a "smart city" are carried out. Algorithmic tools for multi-objective optimization are considered.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БПЛА – безпілотні літальні апарати.

AR (англ. Augmented Reality) – доповнена реальність.

DAG (англ. Directed Acyclic Graphs) – спрямовані ациклічні графи.

DL (англ. Deep Learning) – глибоке навчання.

DQN (англ. Deep Q-Network) – глибока Q-мережа.

DRL (англ. Deep Reinforcement Learning) – глибоке навчання з підкріпленням.

DVFS (англ. Dynamic Voltage and Frequency Scaling) – динамічне масштабування напруги та частоти.

FO (англ. Full Offloading) – повне вивантаження обчислень.

GT (англ. Game Theory) – теорія ігор.

IoT (англ. Internet of Things) – Інтернет речей.

MAR (англ. Mobile Augmented Reality) – мобільна доповнена реальність.

MEC (англ. Mobile/Multi-Access Edge Computing) – мобільні/багатодоступні граничні обчислення.

ML (англ. Machine Learning) – машинне навчання.

PSO (англ. Particle Swarm Optimization) – оптимізація роєм частинок.

QoS (англ. Quality of Service) – якість обслуговування.

RL (англ. Reinforcement Learning) – навчання з підкріпленням.

SLA (англ. Service Level Agreements) – угоди про рівень обслуговування.

UAVs (англ. Unmanned Aerial Vehicles) – БПЛА.

V2X (англ. Vehicle-to-Everything) – зв'язок транспортного засобу з усім оточенням.

VEC (англ. Vehicle Edge Computing) – граничні обчислення для транспортних засобів.

ЗМІСТ

ВСТУП		9
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТА	АРХІТЕКТУРНО-АЛГОРИТМІЧНІ ПРИНЦИПИ ПЕРИФЕРІЙНОЇ	
ОБРОБКИ ДАНИХ У «РОЗУМНИХ МІСТАХ»		12
1.1 Периферійні обчислення як інструмент управління ресурсами		
критично важливих застосувань «розумних міст»		12
1.2 Систематизація алгоритмічних засобів розподілу ресурсів у		
периферійних мережах.....		13
1.3 Аналіз архітектурних характеристик периферійних		
обчислювальних платформ та функціональних вимірів		
розміщення завдань		14
1.4 Структурно-порівняльний аналіз парадигм і моделей		
розвантаження периферійних обчислювальних мереж		15
1.5 Теоретичні засади та концептуальні основи периферійних		
обчислень у критично важливих застосуваннях		18
1.6 Критично важливі застосунки периферійних обчислень.....		19
1.7 Висновок до першого розділу		22
РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА КЛАСИФІКАЦІЯ	АЛГОРИТМІЧНИХ ЗАСОБІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРИФЕРІЙНИХ	
ОБЧИСЛЕНЬ У «РОЗУМНИХ МІСТАХ».....		23
2.1 Алгоритми енергоефективного управління ресурсами		
периферійних обчислень у системах «розумного міста»		23
2.2 Аналіз алгоритмічних засобів мінімізації затримок обробки		
великих даних у периферійних мережах «розумного міста».....		26
2.3 Аналіз методів забезпечення надійності та відмовостійкості		
периферійних обчислювальних систем у середовищі «розумного		
міста».....		30

2.4 Математичні моделі та алгоритмічні засоби багатокритеріальної оптимізації периферійної інфраструктури «розумного міста»	31
2.5 Алгоритмічні засоби інтелектуального керування ресурсами периферійних систем з урахуванням мобільності сервісів «розумного міста».....	34
2.6 Алгоритмічні засоби забезпечення доступності великих даних та оптимізації реплікації у периферійній інфраструктурі «розумного міста».....	37
2.7 Алгоритмічні засоби забезпечення відмовостійкості та надійності обробки великих даних у периферійному середовищі «розумного міста».....	39
2.8 Висновок до другого розділу	40
РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМИ ТА МОДЕЛІ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРИФЕРІЙНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ У «РОЗУМНИХ МІСТАХ».....	41
3.1 Математичні моделі та алгоритми динамічного планування завдань у туманно-периферійних мережах	41
3.2 Класифікація та аналіз математичних методів багатокритеріальної оптимізації периферійних обчислювальних систем	43
3.3 Систематизація дослідницьких прогалин та визначення напрямків оптимізації периферійних обчислень «розумного міста»	48
3.4 Алгоритмічні засоби багатокритеріальної оптимізації та забезпечення відмовостійкості периферійних обчислень «розумного міста».....	49
3.5 Аналіз алгоритмів забезпечення відмовостійкості та безперервності сервісів у хмарно-периферійних архітектурах міських мереж.....	50
3.6 Алгоритмічні засоби енергоефективного управління та балансування навантаження в гетерогенному периферійному середовищі «розумного міста».....	51

3.7 Алгоритмічні засоби забезпечення безпеки даних та підтримки мобільності вузлів у периферійній інфраструктурі «розумного міста».....	52
3.8 Висновок до третього розділу	53
РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	54
4.1 Захист людини від іонізуючих випромінювань	54
4.2 Умови праці працівників ІТ-галузі.....	59
4.3 Висновок до четвертого розділу	63
ВИСНОВКИ.....	64
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ	66

ВСТУП

Актуальність теми. Стрімкий розвиток систем «розумного міста», що ґрунтуються на інтенсивному використанні великих обсягів даних, зумовлює зростання вимог до швидкості, надійності та енергоефективності їх обробки. У цих умовах периферійні обчислення набувають особливого значення, оскільки забезпечують виконання обчислювальних процесів безпосередньо поблизу джерел даних, що дає змогу зменшити затримки передавання інформації, знизити навантаження на центральні обчислювальні ресурси та підвищити оперативність функціонування міських сервісів.

Особливо актуальним є забезпечення ефективної роботи критично важливих застосувань, зокрема у сферах громадської безпеки, охорони здоров'я, моніторингу транспортної інфраструктури та реагування на надзвичайні ситуації. Такі системи характеризуються необхідністю обробки значних обсягів даних у режимі реального часу та потребують своєчасного прийняття рішень. Використання безпілотних літальних апаратів, автономних роботизованих комплексів, інтелектуальних транспортних систем і мереж датчиків генерує значні потоки інформації, обробка яких повинна здійснюватися з мінімальними затримками та високим рівнем надійності.

Водночас обмежені обчислювальні, енергетичні та мережеві ресурси периферійної інфраструктури ускладнюють забезпечення необхідних показників продуктивності. У зв'язку з цим особливого значення набувають алгоритмічні засоби управління ресурсами, які охоплюють розподіл обчислювального навантаження, планування виконання завдань, резервування ресурсів, балансування навантаження, реплікацію даних та оптимальне розміщення сервісів. Ефективність таких алгоритмів безпосередньо впливає на якість функціонування як стаціонарних, так і мобільних сервісів міської інфраструктури.

Сучасні наукові дослідження приділяють значну увагу розробленню та вдосконаленню алгоритмів периферійних обчислень, спрямованих на

підвищення енергоефективності, зменшення затримок, забезпечення відмовостійкості та покращення якості обслуговування. Проте аналіз наукових праць свідчить про наявність низки невирішених проблем, пов'язаних із багатокритеріальною оптимізацією ресурсів, забезпеченням безперервності функціонування сервісів, підтримкою мобільності вузлів та ефективною обробкою великих даних у динамічному середовищі «розумного міста». Це зумовлює необхідність подальшого розвитку алгоритмічних засобів периферійних обчислень, здатних забезпечити підвищення ефективності, надійності та безпеки обробки даних у сучасних міських інформаційних системах. Тому алгоритмічні засоби периферійних обчислень для обробки великих даних розумних міст є актуальним напрямом сучасних досліджень.

Мета і задачі дослідження. Метою даної кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Бакалавр» є узагальнення теоретичних засад, класифікація та аналіз алгоритмічних засобів периферійних обчислень, а також визначення перспективних підходів до багатокритеріальної оптимізації процесів обробки великих даних у середовищі «розумного міста». Для досягнення поставленої мети потрібно виконати ряд завдань, зокрема:

- Проаналізувати теоретико-методологічні засади периферійних обчислень та їх роль в обробці великих даних у системах «розумного міста».
- Систематизувати алгоритмічні засоби управління ресурсами, розподілу навантаження та розміщення завдань у периферійних обчислювальних мережах.
- Дослідити методи мінімізації затримок, підвищення енергоефективності та забезпечення доступності даних у периферійній інфраструктурі «розумного міста».
- Проаналізувати алгоритми забезпечення надійності, відмовостійкості та безпеки обробки великих даних у периферійному середовищі.
- Визначити перспективні підходи до багатокритеріальної оптимізації периферійних обчислювальних процесів для підвищення ефективності функціонування систем «розумного міста».

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання досліджених алгоритмічних підходів периферійних обчислень для підвищення ефективності, надійності та енергоефективності обробки великих даних у системах «розумного міста» та оптимізації функціонування критично важливих міських сервісів.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТА АРХІТЕКТУРНО-АЛГОРИТМІЧНІ ПРИНЦИПИ ПЕРИФЕРІЙНОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ У «РОЗУМНИХ МІСТАХ»

1.1 Периферійні обчислення як інструмент управління ресурсами критично важливих застосувань «розумних міст»

Розвиток технологій Інтернету речей зумовив масове впровадження різноманітних давачів та мобільних пристроїв, що забезпечують безперервний збір інформації у режимі реального часу [1]. Проте зростання обсягів даних виявило обмеженість обчислювальних потужностей периферійного обладнання [2]. Перенесення ресурсомістких завдань у віддалені хмарні дата-центри [3] супроводжується суттєвими часовими затримками, що є недопустимим для систем моніторингу та управління в умовах «розумного міста».

Рішенням цієї проблеми став перехід до периферійних («edge») обчислень, які наближають процеси обробки та зберігання інформації безпосередньо до джерел її генерації [4]. Такий підхід радикально знижує затримки та гарантує високу швидкість реагування, що є критично важливим для сервісів екстреного реагування [5], військових мереж [6], телемедицини [7] та іншої життєво необхідної міської інфраструктури.

Інтеграція периферійних систем із мережами Інтернету речей суттєво оптимізує використання наявних ресурсів [8]. Водночас функціонування багаторівневих периферійно-хмарних архітектур у багатокористувацькому середовищі вимагає розробки нових алгоритмічних засобів. Головним науковим викликом є збалансування надійності, доступності, вартості та енергоефективності з урахуванням нормативних показників якості обслуговування.

1.2 Систематизація алгоритмічних засобів розподілу ресурсів у периферійних мережах

Проектування ефективної інфраструктури «розумного міста» вимагає комплексного аналізу методів управління ресурсами в динамічних периферійних середовищах. Наявні стратегії розподілу завдань класифікують на інтелектуальні алгоритми та детерміновані математичні підходи [5]. Для оптимізації обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних «розумного міста» ключове значення мають:

- сервіси відеоаналітики;
- впорядкування завдань на основі спрямованих ациклічних графів;
- адаптивні глибокі нейромережі [5];
- використання методів ML для виділення ресурсів у системах з багатоточковим доступом.

Планування навантаження охоплює евристичні, еволюційні та теоретико-ігрові алгоритми [5], де головний внесок роблять:

- нелінійна неглобальна оптимізація;
- марковські процеси;
- технології контейнеризації.

Розроблені таксономії групують алгоритми за типом навчання та показниками продуктивності. Надійне управління ресурсами в міських умовах базується на:

- прогнозуванні навантаження;
- раціональному розміщенні компонентів;
- еластичності прикладних застосувань [5].

Додаткові дослідження узагальнюють підходи до розвантаження обчислень за критеріями мінімізації затримок та енергоспоживання [9], оцінюють вплив мобільності користувачів на периферійну архітектуру [10], а також аналізують методи оптимізації для зниження системних накладних витрат [5]. Систематизація зазначених підходів підтверджує, що розвиток

нових алгоритмічних засобів є визначальним фактором для підвищення ефективності функціонування та швидкодії сервісів «розумного міста».

1.3 Аналіз архітектурних характеристик периферійних обчислювальних платформ та функціональних вимірів розміщення завдань

Автор [5] визначив три ключові виміри, що впливають на проблему розміщення завдань та можливі рішення. До них належать:

1. Можливості платформ:

- хмарно-периферійна архітектура;
- стратегія контролера розміщення.

2. Характеристики застосувань:

- типи сервісів;
- структура;
- вимоги до безпеки та конфіденційності.

3. Математичні аспекти:

- формулювання задачі;
- методи оптимізації;
- цільові функції;
- обмеження;
- складність рішень.

У [11] здійснено огляд критично важливих програм та розподілу ресурсів. Особливу увагу приділено двом прикладам – управління стихійними лихами та військових операцій – для демонстрації практичної реалізації МЕС. Дослідження окреслило майбутні виклики у сферах мобільності, безпеки та приватності, розвиток сталих і екологічно дружніх рішень МЕС, а також створення ефективних випробувальних стендів для експериментів та валідації.

Таким чином, наведені результати підкреслюють важливість алгоритмічних засобів управління ресурсами у периферійних обчисленнях, що

є ключовим для ефективної обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних «розумного міста» [12].

1.4 Структурно-порівняльний аналіз парадигм і моделей розвантаження периферійних обчислювальних мереж

Порівняльний аналіз наявних оглядів свідчить, що більшість наукових публікацій фокусується на процесах розвантаження обчислень, тоді як питання спільної обробки, справедливості розподілу та балансування навантаження висвітлені значно менше [5]. В таблиці 1.1 подано опис досліджень в царині алгоритмів розвантаження перехідних периферійних обчислень для систем «розумного міста».

Таблиця 1.1 – Дослідження в царині алгоритмів розвантаження перехідних периферійних обчислень для систем «розумних міст»

Галузь досліджень	Основний акцент
Розвантаження обчислень при розподілі ресурсів	Алгоритми на основі PO та FO [5]
Міграція сервісів і розвантаження обчислень	Архітектура та режими розвантаження [13]
Архітектура та моделювання	Методи моделювання розвантаження [5]
Розвантаження обчислень	Централізовані та розподілені методи [14]
Розвантаження обчислень	Класифікація існуючих підходів [5]

Дослідження різних обчислювальних парадигм дало змогу виокремити характеристики та виклики, властиві периферійній транспортній інфраструктурі [15]. В таблиці 1.2 подано опис досліджень в царині алгоритмів розвантаження різнотипових периферійних обчислень для систем «розумного міста».

Таблиця 1.2 – Дослідження в царині алгоритмів розвантаження різнотипових периферійних обчислень для систем «розумних міст»

Парадигма	Галузь досліджень	Основний фокус
Мобільні периферійні обчислення	Розвантаження обчислень	Децентралізоване розвантаження та відеоаналітика [5]
Мобільні периферійні обчислення	Розвантаження обчислень	Затримка та енергоспоживання [9]
Мобільні периферійні, хмарні та туманні обчислення	Розвантаження обчислень	Розвантаження завдань із використанням RL/DRL [16]

Для структурування взаємодії у [5] запропоновано трирівневу гетерогенну мережу, яка об'єднує рівні периферійних пристроїв, локальних вузлів та хмари, а також базову модель розподілу ресурсів для прийняття рішень щодо перенесення завдань. В таблиці 1.3 подано опис досліджень алгоритмічних засобів управління та розподілу ресурсів у периферійних обчисленнях з багатоточковим доступом для систем «розумного міста»

Таблиця 1.3 – Дослідження алгоритмічних засобів управління та розподілу ресурсів у периферійних обчисленнях з багатоточковим доступом для систем «розумних міст»

Галузь досліджень	Основний фокус
Розподіл ресурсів	Кешування, мобільність та архітектура [10]
Розподіл ресурсів	Методи ML та DL [5]
Розподіл ресурсів	Транспортні мережі [15]
Планування ресурсів	Методи ML [5]

Окреслені результати обґрунтовують необхідність розвитку нових алгоритмічних засобів управління ресурсами для ефективної обробки великих

за обсягом наборів та колекцій даних «розумного міста». В таблиці 1.4 подано опис досліджень алгоритмічних засобів управління та розподілу ресурсів у різнотипових периферійних обчисленнях для систем «розумних міст».

Таблиця 1.4 – Дослідження алгоритмічних засобів управління та розподілу ресурсів у різнотипових периферійних обчисленнях для систем «розумних міст»

Парадигма	Галузь досліджень	Основний фокус
Туманні та периферійні обчислення	Забезпечення ресурсами	Підходи до управління ресурсами
Мобільні периферійні обчислення [17]	Надання ресурсів	Затримка та енергоспоживання
Перехідні хмарні обчислення [5]	Розподілені застосування	Надійність і методи ML
Перехідні обчислення [5]	Розподіл ресурсів	Якість обслуговування та прийняття рішень
Мобільні периферійні обчислення, периферійна хмара, транспортні засоби та периферійні обчислення [11]	Прогнозування навантаження і розподіл ресурсів	Управління ресурсами для критично важливих застосувань

У [13] було відзначено, що лише два типи критично важливих застосунків отримали висвітлення, при цьому аспекти управління ресурсами залишилися поза увагою. Це підкреслює обмеженість існуючих оглядів у контексті комплексного аналізу:

1. Деякі дослідники у попередніх наукових публікаціях зосереджувалися переважно на окремих цілях, як от енергоефективність та затримка, нехтуючи іншими не менш важливими аспектами. Водночас управління ресурсами у edge-системах є багатокритеріальною задачею, де кожна мета має значний вплив на ефективність системи «розумних міст».

2. Інший аспект, на якому акцентують оглядові наукові публікації, – це розмежування ML та non-ML методів.

1.5 Теоретичні засади та концептуальні основи периферійних обчислень у критично важливих застосуваннях

У процесі дослідження складності рішень у сфері периферійних обчислень для критично важливих програм важливо спиратися на фундаментальні принципи. Периферійні обчислення спрямовані на обробку даних поблизу джерела їх виникнення, а не у централізованих хмарних центрах обробки даних. Спеціалізованим напрямом є автомобільні периферійні обчислення (VEC), що забезпечує локальний аналіз даних безпосередньо у транспортних засобах. Це підвищує ефективність роботи підключених та автономних транспортних засобах, підтримує інтелектуальні транспортні системи, «розумне місто» та міські обчислення, зменшуючи затримку та задовольняючи вимоги до сервісів [5].

VEC використовує ресурси транспортних засобів та прилеглої інфраструктури для оптимізації обсягів даних та програми в режимі реального часу, мінімізуючи залежність від централізованих хмарних центрів обробки даних. Такий підхід підвищує ефективність застосування в транспортних засобах, сприяючи створенню безпечніших та продуктивніших «розумних» транспортних систем. Критично важливі програми в транспортних середовищах часто потребують миттєвої реакції та є надзвичайно чутливими до затримок. У випадках використання «розумних» систем у транспортних середовищах, наприклад у системах екстреного реагування чи автономних автомобілях, мобільність платформи створює унікальні виклики, які необхідні для забезпечення надійності та ефективності роботи. Інтеграція критично важливих застосунків із VEC формує більш надійне, швидке та ефективне середовище для обчислення, що потребує високої надійності, низької затримки та обробки в режимі реального часу. Це є першим етапом розвитку алгоритмічних засобів периферійних обчислень для ефективної обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних «розумного міста».

1.6 Критично важливі застосунки периферійних обчислень

Критично важливі застосунки – це застосунки, що виконують критично важливі функції та потребують обробки, аналізу й прийняття рішень у режимі реального або майже реального часу на рівні периферійних обчислень. На рисунку 1.1 подано класифікацію критично важливих застосунків, сформовану на основі аналізу відповідних наукових статей [5].



Рисунок 1.1 – Класифікація критично важливих застосувань [5]

Відмова у функціонуванні таких «розумних» систем має серйозні наслідки, що виходять далеко за межі ІТ-середовищ: це може призвести до втрати життя, зупинки ключових суспільних процесів та значних фінансових втрат. Важливо підкреслити, що визначення критичної важливості не обмежується технічним аналізом, а має нормативне закріплення. Наприклад, Європейський Союз [18] встановлює регуляції, які підкреслюють критичну роль окремих застосувань та сервісів у суспільстві, визнаючи серйозні наслідки їхньої відмови. Для кожної категорії наведено приклади у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Класифікація критично-важливих застосунків «розумних міст»

Категорії	Приклади
Фінансові «розумні» системи	Торговельні платформи, Системи базового «розумного» банкінгу, «Розумні» системи управління ризиками
Застосування в «розумній» охороні здоров'я	Електронні медичні записи, «Розумні» інформаційні системи лікарень, «Розумні» системи архівування зображень та зв'язку, Платформи телемедицини
«Розумні» системи реагування на надзвичайні ситуації	Системи автоматизованого диспетчеризації, «Розумні» системи екстреного зв'язку, «Розумні» системи управління інцидентами, «Розумні» системи відновлення після стихійних лих
Транспорт та логістика	«Розумні» системи управління повітряним рухом, «Розумні» системи залізничної сигналізації [19], «Розумні» системи управління автопарком, «Розумні» системи управління ланцюгами поставок
Енергетика та комунальні послуги	«Розумні» системи управління енергомережею, «Розумні» системи диспетчерського контролю та збору даних, «Розумні» системи управління інтелектуальними мережами, «Розумні» системи моніторингу нафто- та газопроводів
Оборона та аерокосмічна галузь	«Розумні» системи командування та управління [5], «Розумні» системи супутникового зв'язку, «Розумні» системи шифрування військового класу, «Розумні» системи управління БПЛА
Телекомунікації	«Розумні» системи управління телекомунікаційними мережами, «Розумні» системи комутації мобільних мереж, «Розумна» інфраструктура VoIP (голос через Інтернет-протокол), «Розумні» системи мережевої безпеки та моніторингу
Громадська безпека	«Розумні» системи відеоспостереження та моніторингу, «Розумні» системи контролю доступу та сигналізації, «Розумні» системи екстреного оповіщення, «Розумні» системи судово-медичного аналізу

Подана на рисунку 1.2 таксономія структурує інформаційно-технологічну платформу «розумного міста» через взаємозв'язок гетерогенної обчислювальної інфраструктури, тобто хмарних, туманних та периферійних систем, із критично важливими застосунками Інтернету речей.

Оптимізація взаємодії в межах периферійних обчислень через алгоритмічні засоби управління ресурсами й розвантаження завдань є визначальною для ефективної обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних у «розумному місті». Впровадження БПЛА для повітряного моніторингу й контролю трафіку на базі периферійної інфраструктури суттєво підвищує надійність інтелектуальних транспортних мереж [5].

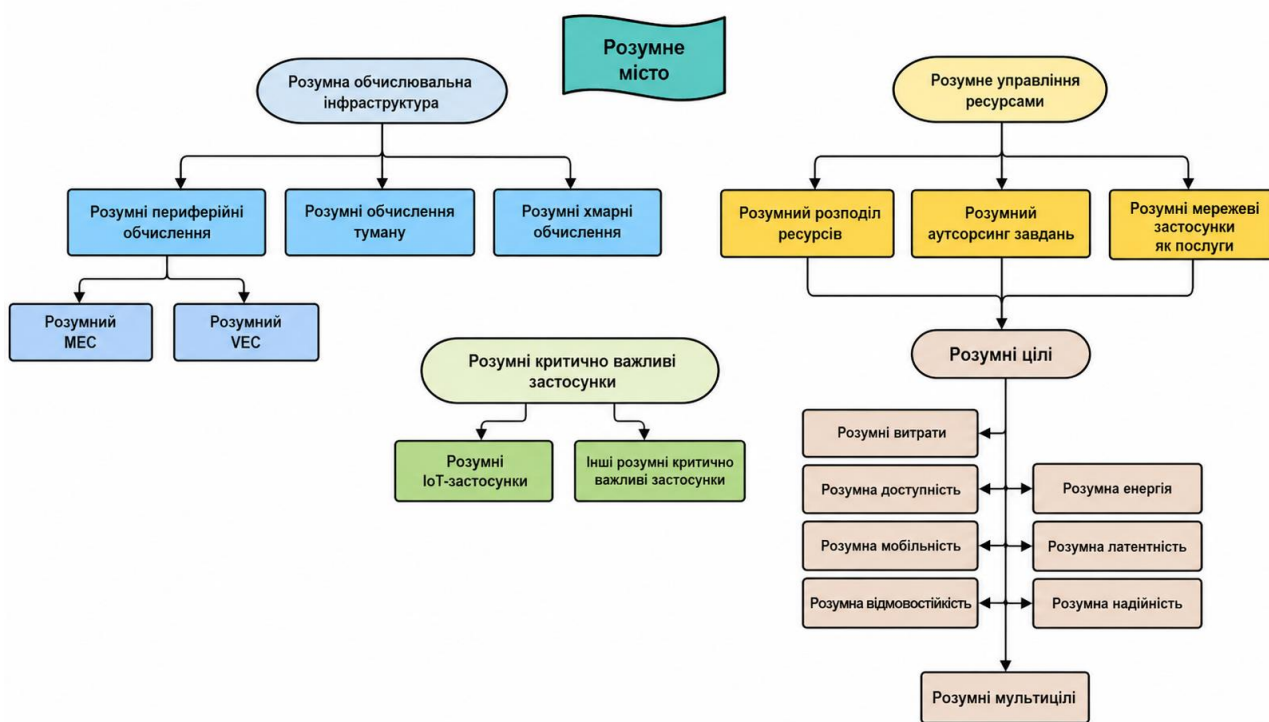


Рисунок 1.2 – Таксономія «розумного міста»

Локалізована обробка інформації задовольняє жорсткі вимоги до часових затримок у сервісах доповненої реальності [20] та системах Інтернету транспортних засобів, гарантуючи швидкість реакції й безпеку руху [5]. Крім того, децентралізовані алгоритми забезпечують віддалений моніторинг та балансування навантаження в інтелектуальних енергетичних мережах «розумного міста» [21]. У сферах «розумної» охорони здоров'я [22] та робототехніки периферійні обчислення підтримують телемедицину й аналіз життєво важливих показників пацієнтів у режимі реального часу. Нарешті, використання локальних серверів оптимізує процеси електронної торгівлі, захист транзакцій та управління запасами [5]. Сукупність цих технологій вимагає проектування багатокритеріальних алгоритмічних засобів для збалансування енергоефективності, мінімізації часових затримок та підвищення стійкості міського середовища.

1.7 Висновок до першого розділу

В першому розділі кваліфікаційної роботи розглянуто периферійні обчислення як інструмент управління ресурсами критично важливих застосувань «розумних міст». Проведено систематизацію алгоритмічних засобів розподілу ресурсів у периферійних мережах. Проаналізовано архітектурні характеристики периферійних обчислювальних платформ та функціональних вимірів розміщення завдань. Подано структурно-порівняльний аналіз парадигм і моделей розвантаження периферійних обчислювальних мереж. Висвітлено теоретичні засади та концептуальні основи периферійних обчислень у критично важливих застосуваннях. Досліджено критично важливі застосунки периферійних обчислень.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА КЛАСИФІКАЦІЯ АЛГОРИТМІЧНИХ ЗАСОБІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРИФЕРІЙНИХ ОБЧИСЛЕНЬ У «РОЗУМНИХ МІСТАХ»

2.1 Алгоритми енергоефективного управління ресурсами периферійних обчислень у системах «розумного міста»

Енергоефективність гетерогенних периферійних систем є визначальною для вартості послуг та сталого функціонування чутливих до затримок застосунків «розумного міста». Для раціонального планування навантаження та управління віртуальними машинами за умови жорстких часових обмежень застосовуються:

- інструменти глибокого навчання [5];
- комплексні стратегії спільного кешування й перенесення процесів [23];
- нейромережеві моделі прогнозування мобільності користувачів у межах задач змішано-цілочисельного нелінійного програмування [24].

Балансування затримок та енергоспоживання у хмарно-туманних середовищах моделюється алгоритмами найменшого резерву часу й методами оптимізації рою частинок [5]. Залежності між потоковими завданнями вирішуються:

- багатокритеріальними еволюційними підходами;
- генетичними алгоритмами;
- динамічним масштабуванням напруги й частоти [25].

З метою зниження накладних витрат проектуються децентралізовані схеми прийняття рішень на основі локального зворотного зв'язку та змішано-цілочисельні лінійні програми [5]. У екологічних мережах «розумного міста» впроваджуються:

- кооперативні схеми бездротової передачі енергії;
- методи стохастичної оптимізації БПЛА;

– моделі федеративного навчання для збалансування тривалості роботи терміналів [5].

Оптимальний розподіл ресурсів додатково забезпечується:

- алгоритмами дихотомії [26];
- марковськими процесами прийняття рішень;
- глибокими нейронними мережами з підкріпленням для динамічної міграції сервісів [5].

Енергоефективність є критичною для міської інфраструктури, де заміна джерел живлення вузлів ускладнена, зокрема у медицині [5], екологічному моніторингу та системах сповіщення [27]. У середовищі Інтернету речей для планування застосовують;

- методи багатокритеріального прийняття рішень;
- декомпозицію завдань у вигляді спрямованих ациклічних графів з урахуванням ризиків у найгіршому випадку;
- моделі спільної оптимізації та мурашині алгоритми [5].

Забезпечення нормативних показників якості обслуговування сервісів Інтернету речей додатково базується на:

- оптимізації Ляпунова для стабілізації довжини черг;
- алгоритмах оптимізації зграї китів для туманних вузлів;
- методах відображення паралельних завдань у режимі реального часу [5].

Спроектвані алгоритмічні засоби гарантують досягнення енергоефективності без перевищення критичних порогів затримки. В таблиці 2.1 подано класифікацію досліджень енергоефективності на основі інтелектуальних та евристичних методів та алгоритмів.

Беручи до уваги вплив енергоспоживання клієнта MAR, затримки обслуговування та точності виявлення під час розвантаження обчислень, було розроблено функцію оцінювання енергоефективності клієнтів MAR із використанням евристичного алгоритму [28].

Таблиця 2.1 – Класифікація досліджень енергоефективності на основі інтелектуальних та евристичних методів

Платформи	Галузь дослідження	Ключовий фокус	Обмеження та цілі	Методологія
Периферійні та хмарно-туманні обчислення	Розвантаження завдань та розподіл навантаження	Завдання та робочі процеси	Затримки, мобільність, час виконання	Евристичні, генетичні алгоритми, оптимізація рою частинок, моделі графіків (DAG, DVFS)
Транспортна периферія та Інтернет речей (IoT)	Планування та розподіл ресурсів	Транспортні засоби та прикладні застосунки	Затримки, параметри комунікації	Навчання з підкріпленням (RL), теорія ігор (GT)

Стосовно середовища VEC, у [5] запропоновано ітераційний алгоритм із двопетльовою структурою, що потребує двох основних ітераційних процесів у процедурі оптимізації. Автори застосували метод Дінкельбаха та техніку блочного координатного спуску, які є математичними методами розв'язання оптимізаційних задач. Головною метою було максимізувати енергоефективність системи MEC на базі UAVs за підтримки інтелектуальних поверхонь, що відбивають, із використанням протоколу неортогонального множинного доступу. Цього вдалося досягти шляхом оптимізації таких параметрів, як розподіл бітів, потужність передачі, зсув фази та траєкторія польоту UAVs. В таблиці 2.2 подано класифікацію досліджень енергоефективності на основі математичних моделей та алгоритмів детермінованої оптимізації. У [5] описано про вивчення проблеми, пов'язаної з ефективним розподілом ресурсів в автономних автомобільних мережах зв'язку в межах інфраструктури «розумного міста».

Таблиця 2.2. Класифікація досліджень енергоефективності на основі математичних моделей та детермінованої оптимізації

Платформи	Галузь дослідження	Ключовий фокус	Обмеження та цілі	Методологія
Периферійні обчислення та цифрові мережі	Розвантаження завдань та кешування програмного забезпечення	Служби, чутливі до затримок, та дані користувачів	Кінцеві терміни, розміри кешу, час виконання	Опукла та неопукла оптимізація, алгоритми бісекції
Гетерогенна та міжхмарна периферія	Розподіл ресурсів та навантаження користувачів	Завдання та робоче навантаження	Мобільність, затримки між хмарами, загальні витрати часу	Методи регуляризації, федеративне навчання, модифіковане масштабування частоти (DVFS)
Енергетичний Інтернет речей та БПЛА	Оптимізація та розподіл ресурсів у бізнес-застосунках	Контейнери завдань	Затримки у бізнес-процесах	

Основну увагу приділено спільному розподілу спектра та потужності в автомобільних мережах, що дає можливість оптимізувати використання енергії. Раціональний розподіл потужності забезпечує мінімально необхідний рівень енергії для комунікації, що своєю чергою надає можливість продовжити тривалість роботи обладнання або транспортних засобів та зберегти енергетичні ресурси.

2.2 Аналіз алгоритмічних засобів мінімізації затримок обробки великих даних у периферійних мережах «розумного міста»

Мінімізація затримок є критично важливою для систем особливої важливості «розумного міста», де швидкість реакції впливає на безпеку життєдіяльності. Для оперативного перенесення процесів розроблено онлайн-алгоритми на базі глибокого навчання, що емулюють роботу точних офлайн-

рішувачів за допомогою глибоких нейромереж. Оптимізація виділення ресурсів та розміщення серверів реалізується через комбінацію точних алгоритмів перебору та методів ранжування із залученням програмно-конфігурованих мереж [5]. Додатково проектування евристичних моделей навчання дає змогу раціонально розміщувати та маршрутизувати віртуалізовані мережеві функції з урахуванням мобільності пристроїв та енергозбереження, а алгоритми глибокого навчання з підкріпленням координують міграцію легковагових мікросервісів для усунення затримок під час перемикання між вузлами [29]. Надійність функціонування підтримується математичним програмуванням із багатокритеріальними експлуатаційними обмеженнями [5]. Крім того, кооперативні архітектури малих стільників об'єднують потужності терміналів, базових станцій та хмарних платформ для зниження кількості збоїв, а інтеграція розширеного кешування у фемто-хмарах мінімізує сумарний час виконання завдань [30].

Децентралізоване перенесення обчислювальної потужності на периферію мережі нівелює вади централізованих хмарних інфраструктур, усуваючи перевантаження каналів зв'язку під час аналізу великих за обсягом наборів та колекцій даних «розумних міст» у режимі реального часу. Для розподілу ресурсів у промислових контейнеризованих середовищах розроблено жадібні алгоритми периферійного планування [5], а концептуальні моделі показників якості обслуговування оптимізують затримки у чутливих до часу системах. Оскільки розташування вузлів безпосередньо впливає на латентність, для інфраструктури Інтернету речей запропоновано точні та наближені методи просторового розміщення туманних елементів. Сценарії з багатьма користувачами ефективно обслуговуються легковаговими алгоритмами виконання обмежень, що адаптуються до параметрів завдань і переміщення хостів, а також моделями глибокого навчання з підкріпленням, які класифікують та пріоритезують сервіси [5]. Таблиця 2.3 систематизує платформи, галузі аналізу та безпосередній алгоритмічний апарат для обробки даних.

Таблиця 2.3 – Алгоритмічні засоби периферійних обчислювальних платформ «розумних міст»

Обчислювальна платформа	Галузь дослідження	Ключова методологія
Гетерогенні периферійні системи [5]	Розвантаження обчислень	Глибоке навчання, глибокі нейромережі
Периферійні обчислення [31]	Розподіл ресурсів	Покращена кластеризація вузлів
Мережі малих стільників з периферійними вузлами [30]	Розвантаження обчислень	Математичне моделювання, оптимізаційні методи
Периферійні обчислення [5]	Прийняття рішень щодо розвантаження	Кооперативна теорія ігор
Туманні обчислення [32]	Промислові туманні системи	Евристичні алгоритми
Периферійний Інтернет речей [5]	Розподіл ресурсів в інфраструктурі речей	Глибоке навчання з підкріпленням, нейромережі
Інтернет транспортних засобів [33]	Розвантаження та розподіл ресурсів	Кластеризація за пріоритетами, умовна оптимізація

У транспортних мережах «розумного міста» загальна затримка декомпонується на три складові: тривалість передачі даних, час очікування у черзі сервера та безпосередній час обробки. Для мінімізації відстані між терміналами та сервісними вузлами в інтелектуальних автомобільних інфраструктурах застосовують алгоритми кластеризації, які здійснюють динамічне ранжування та розвантаження обчислювальних завдань на основі гранично допустимого часу очікування [33]. Спроектоване алгоритмічне забезпечення гарантує стабільно високі показники якості обслуговування в гетерогенних міських мережах.

Таблиця 2.4 фокусується на функціональних вимірах, обмеженнях та цільових метриках обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних. А дослідження [5] згадує про вирішення проблеми оптимального розміщення сервісів V2X у гібридному хмарно-периферійному середовищі «розумного міста».

Таблиця 2.4 – Параметри оптимізації та критерії обмежень у системах «розумного міста»

Об'єкт оптимізації	Визначені обмеження	Супутні цільові метрики
Чутливі до часу завдання [5]	Затримка обробки, канали зв'язку	Мінімізація загального часу відгуку
Периферійні сервіси міського середовища [31]	Показники затримки	Оптимізація розміщення серверів
Критично важливі застосунки [5]	Надійність, ліміти енергоспоживання	Подвійна модульна надмірність
Застосунки доповненої реальності [30]	Тривалість обробки інформації	Фіксація збоїв та часу виконання
Мультикористувацькі прикладні системи [5]	Параметри кешування даних	Оптимізація розподілу сховищ
Оркестрація контейнеризованих служб [32]	Час відновлення після відмов	Забезпечення відмовостійкості
Багатокомпонентні застосунки речей [5]	Пріоритетність чутливих даних	Максимізація якості взаємодії
Критичні за часом транспортні потоки [33]	Енергетичний бюджет, пріоритетність	Обробка великих за обсягом наборів та колекцій даних у режимі реального часу

Для досягнення цієї мети було розроблено аналітичну оптимізаційну модель. Цільова функція цієї моделі полягала в такому розміщенні сервісів V2X на обчислювальних вузлах, яке забезпечує мінімізацію сукупної середньої затримки. Модель враховувала різноманітні обмеження, зокрема затримку передачі даних, доступність обчислювальних ресурсів, надмірність та специфічні умови розміщення вузлів.

2.3 Аналіз методів забезпечення надійності та відмовостійкості периферійних обчислювальних систем у середовищі «розумного міста»

Розгортання застосунків у хмарно-периферійних середовищах «розумного міста» супроводжується:

- обмеженнями пропускної здатності гетерогенністю бездротового зв'язку;
- складнощами розвантаження обчислень;
- ризиками безпеки [9].

Для забезпечення надійності критично важливих міських служб застосовують евристичні алгоритми оптимізації резервних ресурсів та інтелектуальні агенти на основі глибокого Q-навчання для адаптивного розподілу потужностей у режимі реального часу. У мобільних мережах п'ятого покоління високоінтенсивний трафік координується за допомогою програмно-конфігурованих архітектур та алгоритмів оптимізації розподілу фізичних ресурсів на основі метрик балансу [5].

Підвищення стійкості периферійних систем під час обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних реалізується через оптимізацію міжмашинної взаємодії шляхом поєднання рекурентних нейромереж із методами глибокого навчання з підкріпленням [34]. За умов жорстких вимог до латентності offloading-процеси критичних завдань підтримуються схемами неортогонального множинного доступу [5], а швидкі евристичні підходи мінімізують резервні заповнювачі на випадок збоїв вузлів [5]. Надійність розгортання застосунків за обмеженого бюджету оцінюється через критерій покриття за допомогою точних і жадібних методів [35]. Спільне виконання завдань доповненої реальності декількома вузлами моделюється спрямованими ациклічними графами із залученням цілочисельної оптимізації рою частинок, хоча її висока обчислювальна складність накладає обмеження для сервісів в режимі реального часу [5].

Для підвищення потужності багаторівневих периферійних ієрархій ефективно впроваджують параметричні байєсівські оптимізатори, а оптимізація розвантаження в IoT-системах забезпечує досягнення рівноваги між споживанням смуги пропускання та рівнем надійності без порушення показників якості обслуговування [5]. Зрештою, впровадження еластичного управління в масштабах усього мегаполісу є критичним для координації розподілених ресурсів і підтримки стабільних порогів продуктивності під час обробки просторових даних [36].

2.4 Математичні моделі та алгоритмічні засоби багатокритеріальної оптимізації периферійної інфраструктури «розумного міста»

Оптимізація витрат у периферійній інфраструктурі «розумного міста» реалізується через багатокритеріальні алгоритмічні засоби. Для розв'язання NP-важких задач перенесення обчислень застосовують генетичні алгоритми з модифікованою селекцією кросинговеру [5].

У транспортних мережах «розумного міста» обмеження мобільності враховують при частковому розвантаженні обчислень для автомобілів, що проходять точки доступу на високій швидкості. Координація автомобільного обладнання формалізується як задача змішано-цілочисельного нелінійного програмування [37], а для визначення пріоритетності розподілу завдань між транспортними засобами впроваджують алгоритми глибокого Q-навчання, інтегровані з процедурами оцінювання доступності автомобілів [38]. Проблеми масштабованості вирішуються за допомогою хмарно-периферійних архітектур шляхом декомпозиції змішаних нелінійних задач і залучення методів опуклого програмування [39]. В ультращільних міських мережах з багатьма точками доступу стратегії мінімізації довгострокових системних витрат моделюють марковськими процесами прийняття рішень та схемами спільної оптимізації зв'язку й обчислень [5]. Таблиця 2.5 систематизує обчислювальні архітектури та типи вхідних даних.

Таблиця 2.5 – Інфраструктурне середовище та об'єкти обробки

Тип платформи	Об'єкт обробки даних
Мережі 5G / хмарно-периферійні комплекси [40]	Крайні вузли та завдання
Периферійні обчислювальні системи [5]	Обчислювальні завдання
Периферійні платформи / перехідні хмари [41]	Сервіси та застосунки з інтенсивними даними
Периферія / критично важливий Інтернет речей [5]	Застосунки доповненої реальності, короткі пакети
Перехідні (туманні) обчислення [42]	Чутливі до затримок дані та навантаження
Периферійні та транспортні мережі [5]	Потокові мобільні завдання
Транспортна периферія з неортогональним доступом [38]	Автомобільні запити користувачів

У контексті безпеки та обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних розроблено розподілені алгоритми динамічного коригування тактової частоти й потужності передачі [5].

Таблиця 2.6 відображає критерії ефективності та граничні умови функціонування міських служб.

Таблиця 2.6 – Цільові метрики та системні обмеження

Визначені обмеження	Цільова мета / Метрика
Фінансовий бюджет, затримка відгуку [40]	Максимізація потужності, забезпечення якості
Багатоканальний доступ, мобільність [5]	Регулювання потужності передачі даних
Обмеженість локальних ресурсів [43]	Збалансування часу передачі й обробки
Гетерогенність ресурсів, динаміка міста [5]	Доцільність розгортання, надійність
Жорсткі часові терміни [42]	Оптимізація кількості ітерацій передачі
Бюджет на зв'язок [5]	Довгострокова стабілізація черг
Мобільність вузлів, латентність [37]	Оптимізація витрат бортового обладнання

Таблиця 2.7 фокусується на методах вирішення сформульованих оптимізаційних задач.

Таблиця 2.7 – Алгоритмічний та математичний апарат

Напрямок дослідження	Базовий алгоритмічний інструментарій
Розподіл та забезпечення ресурсами [40]	Опукла та послідовна модельно-орієнтована оптимізація
Розвантаження завдань у мережі [5]	Математичний апарат теорії ігор
Управління ресурсами та offloading [43]	DL з підкріпленням, ML
Планування обчислень та розвантаження [5]	Системна теорія оптимізації, нелінійне програмування
Керування реплікацією та планування [42]	Евристичні та метаевристичні алгоритми
Розміщення міських сервісів [5]	Модифіковані генетичні алгоритми
Планування завдань на транспорті [37]	Евристики та методи математичної оптимізації

Для дотримання часових обмежень та мінімізації фінансових витрат планування реплікації даних формують як задачу цілочисельного програмування, що розв'язується швидкими метаевристичними методами [5], а максимізація довгострокового прибутку досягається схемами динамічного резервування та закупівлі ресурсів у режимі реального часу [5].

У критично важливому Інтернеті речей декомпозиція задач на етапи offloading-процесів та оптимізації потужностей мінімізує енерговитрати [43]. Стабільність міських сервісів в режимі реального часу підтримується дворівневим плануванням:

- розміщенням сервісів на макрорівні (кадри);
- обслуговуванням високоінтенсивних потоків даних на мікрорівні (часові-слоти) з урахуванням бюджетних обмежень [5].

Для ресурсомістких і чутливих до затримок застосунків, зокрема, сейсмічного моделювання, виявлення гравітаційних хвиль, використовуються

гібридні хмарно-периферійні алгоритми дотримання часових термінів. При цьому пріоритетність застосунків визначається категоріями угод про рівень обслуговування з фінансовими штрафними коефіцієнтами [5].

2.5 Алгоритмічні засоби інтелектуального керування ресурсами периферійних систем з урахуванням мобільності сервісів «розумного міста»

Хоча планування з урахуванням мобільності було всебічно досліджене в МЕС, переважно як обмеження, яким необхідно керувати, наприклад, у [44], існує небагато досліджень, зосереджених саме на методах підвищення ефективності мобільності, які розроблені для активного покращення мобільності користувачів або сервісів у межах управління ресурсами інфраструктури «розумного міста». В таблиці 2.8 охарактеризовано програмно-алгоритмічні засоби для забезпечення параметрів надійності та відмовостійкості систем.

Таблиця 2.8 – Програмно-алгоритмічні засоби для забезпечення параметрів надійності та відмовостійкості систем

Платформа та об'єкт обробки	Головні обмеження	Цільова метрика	Методологія
1	2	3	4
Периферійні вузли (сервіси)	Час затримки відгуку	Стабільність зв'язку	Евристичні підходи
Периферійні мережі (завдання)	Показники латентності	Надійність передачі	Глибоке Q-навчання
Архітектура 5G (сесії даних)	Затримка пакетів	Надійність комутації	Математичне моделювання
Неортогональний доступ (завдання)	Ресурси, енергобюджет	Енергоефективність	Блочний координатний спуск

Продовження таблиці 2.8

1	2	3	4
Периферійні системи (застосунки)	Бюджет розгортання	Масштабованість	Евристичні алгоритми
Периферія (доповнена реальність)	Показники затримки	Зниження збоїв сервісу	Метаевристична оптимізація
Інтернет речей (завдання)	Обмеження каналів	Смуга пропускання	Евристичні алгоритми
Хмарно-периферійні та туманні вузли	Вимоги до надійності	Енерговитрати, терміни	Навчання з підкріпленням

У дослідженні [5] автори вивчили економічно вигідне розгортання роботів для сценаріїв пошуково-рятувальних операцій під час ліквідації наслідків масштабних катастроф. Більшість розглянутих фізичних роботів є мобільними, на відміну від традиційних інфраструктурних ресурсів (IaaS), як от центри обробки даних. Ця характеристика мобільності роботів суттєво підвищує ймовірність зниження QoS, через що аспект їхнього переміщення має першорядне значення. В таблиці 2.9 описано програмно-алгоритмічні засоби для забезпечення критеріїв доступності даних та балансування навантаження.

Таблиця 2.9 – Програмно-алгоритмічні засоби для забезпечення критеріїв доступності даних та балансування навантаження

Платформа та об'єкт обробки	Головні обмеження	Цільова метрика	Методологія
Хмарно-периферійне середовище	Доступність інформації	Ефективність зберігання	Математичні моделі
Туманні обчислення (мікросервіси)	Смуга пропускання	Пропускна здатність	Нелінійне програмування
Периферійні структури (блоки даних)	Доступність інформації	Продуктивність сховищ	Метаевристична оптимізація

Для прогнозування потоків користувачів між різними вузлами МЕС та передбачення рівня використання ресурсів застосовано метод Гаусса [5]. Додатково було враховано час обслуговування та мережеві витрати для мінімізації виділення сервісів. У праці [45] описано теоретичну концепцію, яка використовує можливості ML на межі мережі. Ця концепція потребує розгортання інтелектуальних моделей поблизу мобільних користувачів, що дає можливість вживати проактивних або реактивних заходів, як от прогнозування мобільності для стримінгових сервісів наднизької затримки в мережах 5G. В таблиці 2.10 охарактеризовано програмно-алгоритмічні засоби для забезпечення динаміки та мобільності у міській інфраструктурі

Таблиця 2.10 – Програмно-алгоритмічні засоби для забезпечення динаміки та мобільності у міській інфраструктурі

Платформа та об'єкт обробки	Головні обмеження	Цільова метрика	Методологія
Периферійне середовище (завдання)	Переміщення користувача	Ефективність виконання	Евристичні алгоритми
Периферійні вузли (запити)	Мобільність, затримка	Корисність системи	Евристичні алгоритми
Транспортний туман (сервіси)	Частота передачі сесій	Стабільність з'єднання	Математичні методи

З урахуванням мобільності користувачів у дослідженні [5] запропоновано підхід на основі порогових значень, який забезпечує створення нових реєстрів, коли час розгортання застосунків стає надмірно високим, та одночасно видаляє наявні реєстри, розташовані далеко від користувачів, для запобігання нераціональному використанню ресурсів.

Стосовно мобільності користувачів [46], задачу розвантаження обчислень було декомпоновано на дві підзадачі: опуклу підзадачу розподілу обчислень та підзадачу прийняття рішень щодо offloading-процесу у вигляді цілочисельного нелінійного програмування. Ці алгоритми орієнтовані на оптимізацію

корисності системи в умовах дефіциту ресурсів та обмежень на затримку завдань. Головною метою авторів у [5] була оптимізація доступності ресурсів, що використовуються для обслуговування запитів МЕС. Вони інтегрували прогнозування мобільності задля мінімізації непотрібних повторних розподілів ресурсів, спричинених переміщенням користувачів.

2.6 Алгоритмічні засоби забезпечення доступності великих даних та оптимізації реплікації у периферійній інфраструктурі «розумного міста»

З точки зору доступності фізичних ресурсів, розподіл ресурсів у периферійних обчисленнях «розумних міст» потребує оптимізації обчислювальних потужностей, об'єму пам'яті для зберігання даних та пропускної здатності мережі в обмеженому за ресурсами периферійному середовищі інфраструктури «розумного міста».

Ефективне управління ресурсами гарантує, що периферійна інфраструктура здатна обробляти робочі навантаження, надавати надійні сервіси та відповідати вимогам доступності даних. Адаптивна стратегія розміщення реплік та пов'язані з нею алгоритми враховують характеристики доступу користувачів, кількість реплік, їхнє розташування, а також пов'язані з ресурсами чинники, як от продуктивність вузлів та узгодженість реплік, для оптимізації доступності даних за умови ефективного керування зазначеними фізичними ресурсами в такому середовищі. Розглядаючи одночасно доступність і надійність [5], стратегія синхронізації реплік надала можливість покращити зчитування даних шляхом зниження затримки запису та підвищення пропускної здатності запису, що забезпечило узгодженість реплік. Стратегія відновлення реплік підвищила надійність даних завдяки зменшенню часу запису та збільшенню пропускної здатності зчитування. Додавши фактор вартості, автори [5] згадують дослідження у якому запропоновано стратегію управління ресурсами для оптимізації робочих навантажень і витрат у периферійній хмарі. Вони також представили стратегію управління репліками

для покращення користувацького досвіду, зменшення накладних витрат на зберігання та забезпечення узгодженості великих за обсягом наборів та колекцій даних. У [47] автори розробили аналітичні моделі та рішення для оцінювання доступності IoT-систем із візантійською відмовостійкістю для критично важливих застосунків. Їхнє дослідження спрямоване на виявлення взаємозв'язку між кількістю серверів у системі, часткою чесних користувачів (незлонавмисних вузлів) та загальною доступністю мережі.

З точки зору типів застосунків, у [5] увагу зосереджено на ефективній оркестрації застосунків у поєднанні хмарного та туманного модулів. Значна кількість обмежень виникала через:

- вимоги до обчислень і зв'язку з боку туманних застосунків;
- доступність ресурсів інфраструктури;
- розташування цільових IoT-об'єктів.

Автори розробили жадібний алгоритм для вирішення оптимізаційної задачі розміщення з урахуванням специфіки застосунків. У міру розширення всеохопного інтернету масштаби IoT-застосунків у сферах високотехнологічного виробництва та «розумного» транспорту стрімко зростають. Ці застосунки висувають жорсткі вимоги до:

- високої швидкості передачі даних;
- достатньої пропускної здатності мережевих засобів;
- безпеки.

Для задоволення цих потреб і надання користувачам швидких з'єднань, миттєвих сервісів, інтелектуальних застосунків та безпечного управління даними, автори у дослідженні [5] запропонували сервіси розміщення копій даних на краї мережі. Вони розглянули чотири практичні сценарії використання та продемонстрували, як їхній підхід може бути реалізований у «розумному» виробництві, «розумному» транспорті, «розумних» громадах, AR, а також у межах концепції «розумного міста».

2.7 Алгоритмічні засоби забезпечення відмовостійкості та надійності обробки великих даних у периферійному середовищі «розумного міста»

Інтелектуальні пристрої, що використовуються як периферійні вузли в інфраструктурі «розумного міста», мають обмежені ресурси та стикаються з вищою частотою збоїв порівняно з традиційними розподіленими системами. Через це забезпечення надійності та доступності застосунків за допомогою відмовостійких систем набуває вирішального значення. Для досягнення цієї мети у дослідженні [5] було розглянуто забезпечення відмовостійкості в гетерогенному багатокористувацькому середовищі МЕС. З метою підвищення ефективності розвантаження сервісів було впроваджено напівонлайнову модель на основі RL для визначення поведінки користувачів під час offloading-процесів. Для запобігання збоям розвантаження через перевантаження ресурсів було інтегровано порогове значення. Крім того, для забезпечення надійного перенесення обчислень було розроблено алгоритм offloading-процесу з адаптивним створенням контрольних точок («check-pointing»).

З точки зору типів застосунків, для забезпечення належного рівня QoS інфраструктура, відповідальна за управління якістю обслуговування, повинна володіти вичерпним розумінням характеристик застосунків та вимог SLA [5]. Для забезпечення виконання орієнтованих на низьку затримку IoT-застосунків у периферійному обчислювальному середовищі стандартизований підхід до управління багатьма застосунками в розподілених системах реалізовано на основі робочих процесів («workflows») [48]. У [5] розглянуто метод забезпечення відмовостійкості для критично важливих IoT-застосунків, спрямований на підвищення надійності виконання завдань у розподілених периферійних обчисленнях. Цей метод потребує локального оцінювання надійності периферійного вузла та застосування засобів відмовостійкості для підвищення загальної доступності застосунка. Для підвищення надійності виконання завдань в режимі реального часу в IoT-системах на базі туманних обчислень у дослідженні [49] запропоновано підхід RL для розподілу основних

і резервних завдань між відповідними вузлами системи. Автори зазначили, що наявні методи часто зосереджуються на затримці та функціональності, але не враховують надійність завдань у режимі реального часу в динамічних середовищах. У [5] наголошено на важливості швидкого реагування медичних систем, які класифікуються як системи з критичними вимогами до безпеки. Функція відмовостійкої передачі даних забезпечила надійність інформаційного обміну між вузлами зберігання та вузлами обробки в туманному середовищі. Беручи до уваги проведенне обговорення цільових функцій надійності, мобільності, доступності та відмовостійкості у контексті управління ресурсами, слід відзначити тісний взаємозв'язок між цими критеріями оптимізації великих за обсягом наборів та колекцій даних.

2.8 Висновок до другого розділу

В другому розділі кваліфікаційної роботи досліджено алгоритми енергоефективного управління ресурсами периферійних обчислень у системах «розумного міста». Проаналізовано алгоритмічні засоби мінімізації затримок обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних у периферійних мережах «розумного міста». Здійснено аналіз методів забезпечення надійності та відмовостійкості периферійних обчислювальних систем у середовищі «розумного міста». Розглянуто математичні моделі та алгоритмічні засоби багатокритеріальної оптимізації периферійної інфраструктури «розумного міста». Досліджено алгоритмічні засоби інтелектуального керування ресурсами периферійних систем з урахуванням мобільності сервісів «розумного міста». Проаналізовано алгоритмічні засоби забезпечення доступності великих за обсягом наборів та колекцій даних та оптимізації реплікації у периферійній інфраструктурі «розумного міста». Розглянуто алгоритмічні засоби забезпечення відмовостійкості та надійності обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних у периферійному середовищі «розумного міста».

РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМИ ТА МОДЕЛІ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРИФЕРІЙНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ У «РОЗУМНИХ МІСТАХ»

3.1 Математичні моделі та алгоритми динамічного планування завдань у туманно-периферійних мережах

З позиції туманних обчислень, у дослідженні [50] автори розкрили взаємозв'язок між затримкою, надійністю, вартістю та енергоспоживанням під час надання ресурсів. Аналіз дає змогу глибоко зрозуміти, як зазначені чинники впливають на процес розподілу ресурсів, та допомагає оцінити їхній кінцевий ефект на результати ресурсного забезпечення інфраструктури «розумного міста». У межах цієї ж обчислювальної парадигми, у [5] подано відмовостійкий алгоритм планування, спрямований на вирішення проблеми надійності зв'язку в IoT-системах. Запропонований алгоритм інтегрує енергоефективні методи створення контрольних точок («check-pointing») та балансування навантаження, що забезпечує покращення показників;

- затримки;
- енергоспоживання;
- вартості виконання;
- використання мережі;
- загальної кількості успішно опрацьованих модулів великих за обсягом наборів та колекцій даних.

У дослідженні [51] розглянуто компроміс між суперечливими цільовими функціями: мінімізація часу обробки завдань призводить до підвищення витрат на віртуальні машини (VM), а максимізація асоціативності завдань вимагає збільшення кількості VM, що також підвищує вартість обслуговування. Для вирішення цієї проблеми було впроваджено метод планування завдань і балансування навантаження на основі інтегрованого прискореного алгоритму рою часток (PSO). Враховуючи енергоспоживання, часову затримку та вартість

обчислень, у праці [5] відзначено дослідження спільної оптимізації розподілу ресурсів та рішень щодо перенесення обчислень. Основною метою наукового пошуку була оптимізація продуктивності промислової IoT-мережі на базі MEC. Цю задачу було декомпоновано на дві підзадачі: першу вирішено за допомогою методу множників Лагранжа, а другу – на основі GT. У [5] дослідники згадали схему розвантаження обчислень, яка складається з двох етапів: централізованої кластеризації користувачів та розподіленого розвантаження обчислень. Вони застосували алгоритм кластеризації K-найближчих сусідів, використовуючи пріоритети користувачів як ознаки. Кластери з високим і низьким пріоритетами були призначені для периферійних та локальних обчислень відповідно. Для користувачів з інших кластерів оптимальну політику розподіленого розвантаження обчислень було сформовано за допомогою DQN. Це дало можливість мінімізувати довгострокові системні витрати. У [52] описано модель надання ресурсів для мікросервісів в інтелектуальних системах охорони здоров'я, де особливу увагу приділено мобільності пристроїв та вирішенню проблем міграції сервісів. Це надає можливість ефективно знизити операційні витрати та зменшити їхній вплив на енергоспоживання. У дослідженні [5] автори запропонували застосування ітераційних методів для покращення призначення серверів завданням з явним урахуванням мобільності агентів. Їхній алгоритм спрямований на оптимізацію процесу розподілу за такими факторами, як затримка зв'язку. У цій праці практичний сценарій застосування охоплював сервіс управління надзвичайними ситуаціями під час пожежі, реалізований в умовах «розумного» підприємства. Стосовно середовища VEC, у [53] впроваджено алгоритм кооперативного розвантаження та планування завдань, який ітераційно розподіляє завдання та генерує квазіоптимальні рішення з поліноміальною часовою складністю. Алгоритм оптимізує виконання завдань завдяки врахуванню компромісу між затримкою, вартістю та продуктивністю ресурсів, забезпечуючи ефективне використання наявної інфраструктури.

3.2 Класифікація та аналіз математичних методів багатокритеріальної оптимізації периферійних обчислювальних систем

Спільна оптимізація обчислювальних витрат та супутніх цільових функцій є ключовим складником проєктування периферійної інфраструктури. Для розміщення критично важливих IoT-сервісів застосовуються генетичні алгоритми реплікації та принципи теорії ігор, що максимізує доступність систем [5]. Мінімізація вартості розгортання та затримок доступу до великих за обсягом наборів та колекцій даних досягається шляхом раціонального розподілу компонентів застосунків між периферійними й хмарними рівнями [54], а компроміс між надійністю та фінансовими витратами вирішується евристичними методами пакування в контейнери [5]. Для інтенсивних потоків даних у медицині адаптовано генетичні алгоритми нелінійного сортування в туманних структурах [5]. Конфіденційність та якість користувацького досвіду захищаються за допомогою математичного апарату оптимізації Ляпунова [5], а динамічні онлайн-схеми на основі теорії ігор ефективно підлаштовуються під мінливі навантаження відеоспостереження у режимі реального часу [55].

Особлива увага приділяється одночасному зниженню затримки та енергоспоживання. Для цього впроваджуються методи навчання з підкріпленням для контейнеризованих середовищ [5], алгоритми зозуліного пошуку для багатокритеріальної оптимізації [56], а також імовірнісна кластеризація туманних вузлів [5]. Задачі змішано-цілочисельного нелінійного програмування з урахуванням мобільності пристроїв вирішуються еволюційними схемами [57]. Компроміс між швидкістю обслуговування та енергоефективністю «розумних» мереж досліджується в умовах стохастичного надходження завдань [5]. Оптимальний розподіл різнотипних запитів забезпечують модульні нейронні мережі у поєднанні з угорським алгоритмом [58], а баланс бізнес-колаборації при інспектуванні інфраструктури за допомогою безпілотних апаратів досягається через двоетапні механізми оптимізації [5].

Таблиця 3.1 систематизує ключові параметри, що визначають апаратно-ресурсну та економічну доцільність функціонування периферійних систем у межах міської інфраструктури. Вона деталізує структуру витрат енергії периферійними вузлами та мережею радіодоступу, а також окреслює фінансові чинники, які забезпечують раціональний баланс між вартістю обчислень і якістю використання наявних ресурсів.

Таблиця 3.1 – Алгоритмічні критерії апаратно-ресурсної ефективності периферійних систем

Критерій оптимізації	Оптимізаційні параметри та складові
Енергоспоживання	<ul style="list-style-type: none"> – Витрати енергії периферійними мобільними пристроями при обробці завдань. – Енергоспоживання під час бездротової передачі великих за обсягом наборів та колекцій даних. – Загальний енергетичний баланс інфраструктури мережі радіодоступу.
Економічна вартість	<ul style="list-style-type: none"> – Накладні фінансові витрати на використання обчислювальних ресурсів. – Комунікаційна вартість мережевого обміну в міському середовищі. – Баланс між витратами інфраструктури та заданим рівнем якості сервісів.

Таблиця 3.2 класифікує експлуатаційні характеристики, відповідальні за безперервність, стійкість та часову ефективність аналізу інформаційних потоків. У ній структуровано складові системних затримок, критерії відмовостійкості розподілених серверів у разі виникнення збоїв, а також параметри постійної доступності крайових сховищ великих за обсягом наборів та колекцій даних «розумного міста».

Таблиця 3.2 – Параметри надійності та системної латентності обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних «розумних міст»

Критерій оптимізації	Оптимізаційні параметри та складові
Часова затримка	<ul style="list-style-type: none"> – Тривалість виконання обчислень на крайових вузлах. – Мережева затримка при передачі інформаційних пакетів. – Загальний час затримки відгуку системи, від запиту до результату.
Надійність і відмовостійкість	<ul style="list-style-type: none"> – Здатність міської інфраструктури до безперервної роботи при збоях. – Стійкість і стабільність функціонування розподілених периферійних серверів. – Адаптивне резервування апаратних ресурсів.
Доступність даних	<ul style="list-style-type: none"> – Безперервна доступність крайових сховищ великих за обсягом наборів та колекцій даних. – Готовність до обслуговування з боку периферійних пристроїв та сервісів «розумного міста».

Виділення цих критеріїв забезпечує комплексне розуміння чинників, що впливають на ефективність, продуктивність та результативність систем МЕС. Ця інформація може слугувати підґрунтям для процесів прийняття рішень, а також для проектування та розробки рішень у сфері периферійних обчислень та МЕС, які пріоритезують ці цілі оптимізації великих за обсягом наборів та колекцій даних. Таблиця 3.3 подає класифікацію інфраструктурних та ресурсних обмежень, які є визначальними для проектування апаратної частини «розумного міста». У ній систематизовано параметри загального енергоспоживання мережевих компонентів, структуру фінансових витрат на розгортання крайових вузлів, а також вимоги до надійності та стійкості розподілених серверів перед загрозою виникнення критичних апаратних збоїв.

Таблиця 3.3 – Класифікація багатокритеріальних обмежень інфраструктурних ресурсів «розумних міст»

Область оптимізації	Обмеження та аналізовані параметри інфраструктури	Метод розгортання та фокус
Енергоспоживання	<ul style="list-style-type: none"> – Сумарні енерговитрати крайової системи. – Споживання енергії мережею радіодоступу при передачі потоків даних. – Корисна енергія розвантаження обчислень периферійних пристроїв. 	Інтеграція в периферійні сервери та базові станції міської мережі зв'язку.
Економічна вартість	<ul style="list-style-type: none"> – Загальні апаратні та комунікаційні витрати. – Компроміс між вартістю виділення ресурсів та заданою якістю сервісів. 	Динамічний розподіл бюджету між хмарним та крайовим рівнями.
Надійність системи	<ul style="list-style-type: none"> – Стійкість та відмовостійкість ресурсів міської інфраструктури. – Здатність периферійних серверів зберігати стабільність при апаратних збоях. 	Проактивне та реактивне резервування критичних вузлів.

Таблиця 3.4 структурує цільові метрики якості обслуговування, що безпосередньо впливають на кінцевого користувача міських сервісів. Вона деталізує складові часової латентності – від тривалості виконання алгоритмів до повної затримки відгуку системи, – а також визначає критерії безперервної

доступності децентралізованих сховів великих за обсягом наборів та колекцій даних і крайових серверів у режимі реального часу.

Таблиця 3.4 – Систематизація цільових метрик якості обслуговування користувачів

Критерій ефективності	Складові параметри метрики якості (QoS)	Область моніторингу великих за обсягом наборів та колекцій даних
Часова затримка	<ul style="list-style-type: none"> – Тривалість виконання обчислювальних алгоритмів. – Латентність передачі інформації каналом зв'язку. – Повна затримка відгуку сервісу – час очікування результату. 	Потокові критично важливі застосунки – транспорт, екстрені служби.
Доступність сервісів	<ul style="list-style-type: none"> – Безперервна готовність децентралізованих сховищ великих за обсягом наборів та колекцій даних. – Доступність крайових серверів та периферійних пристроїв для обробки запитів. 	Сховища просторових даних та сенсорні мережі «розумного міста».

Відмовостійкість «розумних» периферійних систем підтримується методологіями контрольних точок і реплікації [48], а також схемами віртуалізації мережевих функцій, що орієнтовані на ультранадійні комунікації [5]. У транспортних середовищах «розумного міста» багатокритеріальна оптимізація охоплює спільне позиціонування БПЛА та міграцію сервісів [5], використання обчислювальних потужностей самих «розумних» транспортних засобів, а також адаптивну стохастичну оптимізацію для усунення затримок у

чергах без попередніх знань про майбутній стан мережі [5]. Зазначені алгоритмічні підходи забезпечують комплексне вирішення проблем вартості, енергоспоживання, затримки та надійності периферійних систем.

3.3 Систематизація дослідницьких прогалин та визначення напрямків оптимізації периферійних обчислень «розумного міста»

Попри зростаючий інтерес наукової спільноти, багато аспектів керування ресурсами все ще залишаються недостатньо дослідженими. Це особливо відчутно при врахуванні унікальних обмежень периферійної інфраструктури під час обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних:

- лімітована обчислювальна потужність;
- доступність енергії;
- нестабільність з'єднання;
- географічна розподіленість вузлів.

Рисунок 3.1 ілюструє компромісні співвідношення між ключовими критеріями ефективності та системними обмеженнями в процесі оптимізації периферійних обчислень.

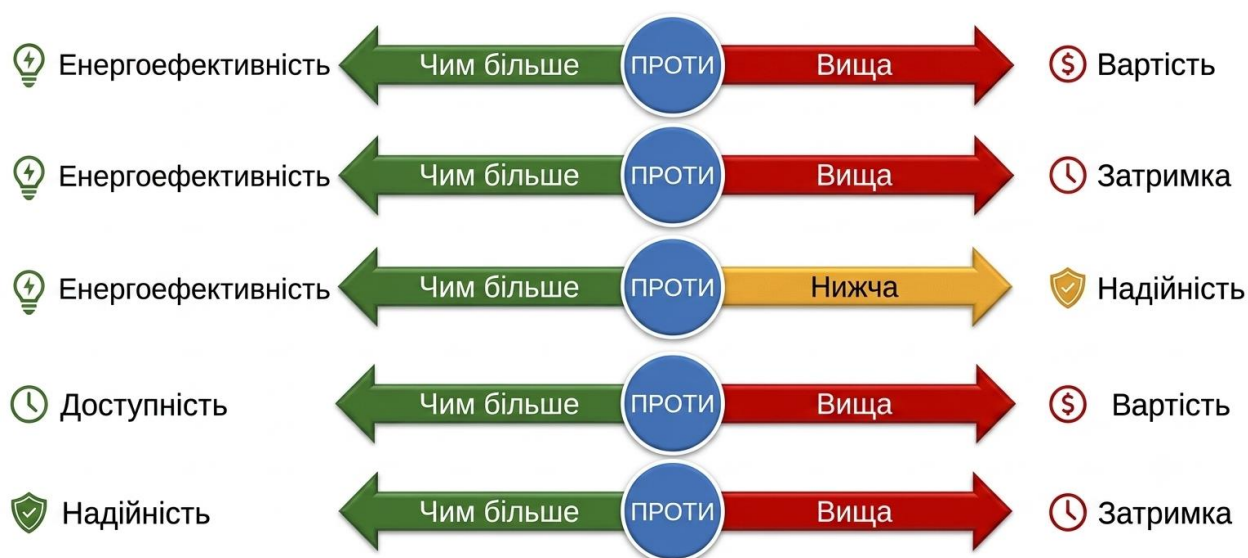


Рисунок 3.1 – Взаємозв'язок та компромісні співвідношення між ключовими критеріями оптимізації периферійних систем

Графічно відображено, що підвищення рівнів енергоефективності, доступності чи надійності безпосередньо призводить до збільшення фінансових витрат і часових затримок або ж вимагає зниження інших експлуатаційних параметрів. Окреслені виклики зумовлюють не лише технічні труднощі, а й відкривають можливості для вагомих інновацій у різних вимірах управління ресурсами периферійних систем під час обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних. Сформульовані положення створюють підґрунтя для подальшого розширення наявного стану наукових знань у контексті оптимізації функціонування інфраструктури «розумного міста».

3.4 Алгоритмічні засоби багатокритеріальної оптимізації та забезпечення відмовостійкості периферійних обчислень «розумного міста»

Оптимізація периферійних обчислень в інфраструктурі «розумного міста» супроводжується конфліктом цільових функцій, де покращення одного показника погіршує інші. Під час розподілу ресурсів складною науковою задачею є керування конкуруючими критеріями:

- енергоефективністю;
- латентністю;
- вартістю;
- надійністю;
- доступністю.

Більшість наявних багатокритеріальних підходів зосереджена на компромісі між енергоспоживанням та затримкою, проте вони не повною мірою враховують специфіку різних типів застосунків і вимоги користувачів щодо розв'язання внутрішніх конфліктів між параметрами системи.

Особливого значення набувають методи резервування та відмовостійкості в багатокритеріальних критично важливих системах обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних «розумних міст», де наявність єдиної точки збою є неприпустимою. Дублювання та розподіл життєво важливих функцій

між численними периферійними вузлами суттєво знижує ймовірність апаратних або програмних збоїв. Інтеграція багатокритеріальної оптимізації зі стратегіями відмовостійкості забезпечує стійкість обчислювальних середовищ, гарантуючи високу доступність і стабільну продуктивність аналізу просторових даних у динамічних сценаріях «розумного міста».

3.5 Аналіз алгоритмів забезпечення відмовостійкості та безперервності сервісів у хмарно-периферійних архітектурах міських мереж

На відміну від централізованих хмарних систем, периферійні обчислювальні пристрої функціонують у динамічних умовах і частіше зазнають збоїв, втрати живлення або мережевого з'єднання. Попри це, більшість досліджень розглядають надійність лише як обмеження, а існуючі методи відмовостійкості переважно орієнтовані на хмарну інфраструктуру. Для ефективного управління ресурсами та обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних «розумного міста» необхідна адаптація механізмів реплікації, балансування навантаження та резервування, із впровадженням проактивних засобів запобігання збоям і реактивних методів швидкого відновлення сервісів.

Забезпечення безперервності надання послуг потребує врахування архітектурних змін у мобільних мережах, зокрема розвитку мікрокомірок [59]. Завдяки нижчій потужності та територіальному дублюванню, такі соти знижують рівень інтерференції й підвищують пропускну здатність. У разі відмови однієї мікрокомірки сусідні вузли здатні динамічно збільшувати потужність покриття, що безпосередньо підвищує відмовостійкість периферійних обчислень. Відтак, подальший розвиток алгоритмічних засобів має фокусуватися на інтеграції методів відмовостійкості периферійних пристроїв та мережевої інфраструктури для гарантування загальної надійності міських систем.

3.6 Алгоритмічні засоби енергоефективного управління та балансування навантаження в гетерогенному периферійному середовищі «розумного міста»

Функціонування критично важливих застосунків у периферійних обчисленнях «розумних міст» супроводжується комплексом викликів, що виходять за межі оптимізації лише одного параметра. В умовах використання обмежених у ресурсах мобільних вузлів виникає гостра потреба в забезпеченні концепції екологічних обчислень у межах інфраструктури «розумного міста».

Енергоефективність у таких сценаріях має узгоджуватися з жорсткими вимогами до надійності та продуктивності. Для якісної обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних «розумного міста» у режимі реального часу необхідне впровадження методів, які пріоритезують критичні завдання, раціонально керують потужностями та мінімізують накладні витрати на передачу інформації задля збереження заряду акумуляторів. Відтак, алгоритмічні засоби розвантаження та розподілу навантаження мають динамічно адаптуватися до поточного стану каналів зв'язку та ємності джерел живлення периферійних пристроїв.

Забезпечення високої доступності периферійних сервісів в умовах змінного попиту та обмежених ресурсів периферійних пристроїв є вагомим викликом під час обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних «розумних міст». Алгоритми розподілу потужностей повинні враховувати поточний стан інфраструктури для підтримання заданого рівня якості обслуговування в динамічному середовищі «розумного міста». Проте в більшості сучасних наукових публікацій цей показник розглядається лише опосередковано.

Диверсифікована структура периферії, що об'єднує смартфони, сервери та пристрої Інтернету речей, суттєво ускладнює менеджмент через високу гетерогенність вузлів. Потреба врахування цього чинника для максимізації ефективності використання ресурсів виникла ще за часів розвитку хмарних

систем [5], проте для периферійних обчислень ця наукова прогалина досі залишається актуальною.

Перспективи розвитку інфраструктури «розумного міста» пов'язані зі стрімким зростанням попиту на високошвидкісне з'єднання, що зумовлює впровадження інтегрованих супутниково-авіаційно-наземних мереж [5]. Об'єднання космічного, повітряного та наземного сегментів за допомогою супутників, висотних станцій та БПЛА дає змогу кардинально розширити зону покриття й підвищити швидкість передачі великих за обсягом наборів та колекцій даних. Це гарантує стабільне підключення периферійних компонентів у будь-яких децентралізованих сценаріях функціонування міського середовища.

3.7 Алгоритмічні засоби забезпечення безпеки даних та підтримки мобільності вузлів у периферійній інфраструктурі «розумного міста»

Периферійні пристрої «розумних міст» здійснюють збір та обробку конфіденційної інформації у критично важливих секторах, зокрема в охороні здоров'я, що зумовлює підвищену увагу дослідників до питань безпеки та приватності великих за обсягом наборів та колекцій даних [7]. Системи управління ресурсами в інфраструктурі «розумного міста» повинні інтегрувати механізми контролю доступу, протоколи шифрування та методи ізоляції для захисту інформації на периферійному рівні з урахуванням нормативних вимог законодавства. Комплексне розв'язання безпекових викликів є критичним для захисту периферійних серверів і надійності мережевої взаємодії, де процеси розвантаження завдань найчастіше стикаються з перешкодами.

Мобільність зазвичай трактується як жорстке обмеження через її деструктивний вплив на латентність, стабільність зв'язку та безперервність сервісів у режимі реального часу, як от автономний транспорт чи екстрені служби. Проте в контексті обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних переміщення вузлів слід розглядати не як негативний чинник, а як фундаментальну властивість міського середовища. Це вимагає розробки

відповідних алгоритмічних засобів для активної підтримки та покращення параметрів зв'язку в динамічній інфраструктурі «розумного міста».

3.8 Висновок до третього розділу

В третьому розділі кваліфікаційної роботи досліджено математичні моделі та алгоритми динамічного планування завдань у туманно-периферійних мережах. Здійснено класифікацію та аналіз математичних методів багатокритеріальної оптимізації периферійних обчислювальних систем. Проведено систематизацію дослідницьких прогалін та визначення напрямків оптимізації периферійних обчислень «розумного міста». Розглянуто алгоритмічні засоби багатокритеріальної оптимізації та забезпечення відмовостійкості периферійних обчислень «розумного міста». Проаналізовано алгоритми забезпечення відмовостійкості та безперервності сервісів у хмарно-периферійних архітектурах міських мереж. Досліджено алгоритмічні засоби енергоефективного управління та балансування навантаження в гетерогенному периферійному середовищі «розумного міста». Розглянуто алгоритмічні засоби забезпечення безпеки даних та підтримки мобільності вузлів у периферійній інфраструктурі «розумного міста».

РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Захист людини від іонізуючих випромінювань

Забезпечення захисту працюючих від впливу іонізуючих випромінювань є базовою вимогою під час проектування та впровадження інтелектуальних комплексів «розумних міст». Попри уявну віддаленість проблеми радіаційної безпеки від завдань аналізу стану води, наявність природних радіонуклідів, а також ризики техногенних аварій та радіаційних інцидентів роблять цей чинник критично важливим. Обслуговуючий персонал та оператори можуть здійснювати діяльність в умовах підвищеного радіаційного фону. Нехтування правилами безпеки загрожує здоров'ю працівників, що безпосередньо знижує надійність функціонування моніторингових комплексів і точність даних, які надходять до споживачів.

Радіаційний чинник суттєво впливає і на технічну архітектуру та стійкість засобів автоматизації «розумних міст». Вимірювальні пристрої та аналізатори, які реєструють вміст радіонуклідів у воді, повинні поєднувати високу чутливість із радіаційною стійкістю для збереження точності вимірів та довговічності. Недостатнє екранування обладнання призводить до апаратних збоїв, викривлення результатів або повної відмови технічних засобів, що унеможлиблює своєчасне виявлення радіоактивної загрози та належне реагування на неї.

У межах безпеки життєдіяльності критично важливою є не лише повсякденна захищеність персоналу під час експлуатації мереж децентралізованих пристроїв, а й готовність до ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. Хоча більшість підприємств водопостачання безпосередньо не взаємодіють із джерелами радіації, сучасні цифрові технології інтегруються в об'єкти критичної інфраструктури (енергетичні, медичні, оборонні комплекси), де ризик опромінення є високим. Тому глибоке розуміння

природи радіаційного впливу та засвоєння методів захисту є обов'язковим елементом підготовки інженерних кадрів.

Іонізуюче випромінювання є потоком енергії, що зумовлює іонізацію атомів і молекул речовини. Основними його видами є альфа-, бета-, гамма- та нейтронне випромінювання. Альфа-частинки мають значну масу і низьку проникну здатність (затримуються аркушем паперу); бета-частинки характеризуються вищою проникністю (екрануються тонким шаром металу); гамма-випромінювання має максимальну проникність і вимагає захисних бар'єрів зі свинцю або товстого шару бетону. Нейтронні потоки, що виникають під час ядерних реакцій, несуть особливу біологічну небезпеку [60].

У промисловості джерелами випромінювання виступають дефектоскопи, рентгенівські прилади, генератори нейтронів та радіоактивні матеріали. У медицині – це апарати променевої терапії та томографи, а в енергетиці – обладнання атомних станцій та супутніх електричних мереж. Оскільки сучасні розподілені обчислювальні мережі інтегруються в зазначені середовища як елементи автоматизованого управління, знання радіаційної безпеки є необхідними як для польових інженерів, так і для працівників диспетчерських центрів.

Раптове виникнення радіаційної небезпеки можливе через аварії чи технічні несправності обладнання, що містить радіонукліди. Зокрема, деструкція ізоляції кабелів чи систем живлення у пристроях із джерелами випромінювання може спровокувати їх перегрів, займання або вибух. За відсутності автоматизованого сповіщення чи у разі затримки реакції персоналу локальний інцидент переростає в масштабну аварію.

Небезпечними сценаріями є також пошкодження медичного діагностичного обладнання у разі його тривалої роботи без екранування, аварії на промислових підприємствах поблизу центрів обробки даних або дорожньо-транспортні пригоди під час перевезення небезпечних вантажів. У таких умовах непідготовлений персонал може зазнати критичного опромінення вже в перші хвилини.

Захист працюючих базується на комплексному поєднанні індивідуальних та колективних заходів. До індивідуальних засобів належать протирадіаційні костюми, захисні фартухи, респіратори, а також індивідуальні дозиметри. Персонал повинен володіти навичками використання цих засобів та знати регламент допустимого часу перебування в них. Колективний захист передбачає наявність герметичних сховищ та захисних споруд із системами фільтрації повітря та екранованими стінами. На підприємствах визначаються зони з мінімальним радіаційним фоном для розміщення резервних обчислювальних потужностей та систем управління. Також створюється запас розчинів для деконтамінації та очищення шкірних покривів.

Фундаментальними принципами безпеки є час, відстань та екранування: мінімізація часу перебування в зоні небезпеки, максимальне віддалення від джерела та використання щільних захисних екранів суттєво знижують отриману дозу.

Для ефективного реагування розробляється детальний план дій. Евакуаційні маршрути адаптуються під архітектуру конкретного об'єкта з урахуванням розташування серверних приміщень, периферійних пристроїв та точок контролю доступу.

У разі аварії системи тривоги активуються миттєво за допомогою сирен, світлових індикаторів та повідомлень у внутрішній мережі. Сучасні алгоритмічні засоби дозволяють автоматизувати надсилання текстових повідомлень, електронних листів та термінових сповіщень, а також забезпечують автоматичний виклик рятувальних служб без участі людини [61].

Особливе значення мають периферійні пристрої, інтегровані з давачами радіаційного моніторингу. При фіксації критичних показників система спроможна не лише видати сигнал тривоги, а й заблокувати замки на входах до небезпечних зон, скоригувати маршрути руху людей та запустити алгоритми захисту інформації (автоматичне резервне копіювання, коректне вимкнення серверів та знеструмлення обладнання).

Алгоритм дій працівників передбачає негайне залишення зони ураження, проходження санітарної обробки, збір у визначених пунктах, дозиметричний контроль та інформування керівництва. Персонал повинен чітко знати схеми розміщення аптечок, захисного одягу та аварійних виходів.

Злагодженість дій підприємства в непередбачуваних обставинах забезпечується автоматизацією безпекових процесів на основі сучасних технологій та регулярним проведенням тренувань. Впровадження розподілених мереж збору даних у системи цивільного захисту дозволяє не лише оптимізувати процеси управління, а й мінімізувати людські втрати.

Захист в умовах надзвичайних ситуацій є багаторівневим процесом, який вимагає адаптації традиційних підходів до умов широкого впровадження інтелектуальних пристроїв. Це забезпечує високу швидкість прийняття рішень, точну реєстрацію перебування працівників та миттєве реагування на загрози.

Під час аварії критично важливо швидко встановити місцезнаходження людей. Периферійні пристрої моніторингової мережі у таких умовах трансформуються в інструменти пошуку постраждалих, контролю евакуаційного потоку та блокування доступу до небезпечних локацій.

Сучасні розподілені цифрові системи дають можливість:

- реєструвати останню відому координату перебування особи;
- відображати дані про чисельність персоналу на об'єкті в момент аварії;
- автоматично фіксувати евакуйованих осіб на контрольно-пропускних пунктах;
- формувати динамічні списки відсутніх для координації пошуково-рятувальних робіт.

Ці відомості є безцінними у перші хвилини інциденту. У поєднанні з відеоаналітикою та модулями розпізнавання облич система здійснює автоматичний моніторинг переміщень персоналу територією об'єкта у режимі реального часу.

За загрози радіаційного забруднення головною функцією периферійних засобів стає автоматичне вимірювання рівнів випромінювання. Сучасні

детектори інтегруються в децентралізовану мережу, передаючи показники на центральні сервери або до хмарних сховищ без затримок.

Система раннього попередження на основі таких сенсорів забезпечує:

- безперервний аналіз гамма-фону в різних точках об'єкта;
- фіксацію мінімальних відхилень від норми, що свідчать про герметичність обладнання;
- увімкнення сигналізації та блокування замків у зоні аварії при перевищенні порогів;
- автоматичне інформування диспетчерів та служб цивільного захисту;
- архівацію даних для аналізу динаміки радіаційного стану.

Отже, врахування вимог радіаційного захисту під час проектування та експлуатації інтелектуальних систем контролю водних ресурсів є запорукою їх загальної надійності. Це гарантує безпеку працівників і безперервність екологічного моніторингу, що є фундаментальним для збереження здоров'я населення. Комплексний підхід, що поєднує захист людського чинника та технічних компонентів, дозволяє створювати стійкі та безпечні алгоритмічні рішення для інфраструктури «розумних міст».

Крім того, специфіка радіаційного захисту визначає критерії вибору матеріалів для корпусів та електронних плат пристроїв, інтегрованих у водні мережі. Конструктивні матеріали мають бути стійкими до корозії та хімічного впливу, а також володіти низькою здатністю до наведеної активності під дією випромінювання, щоб самі пристрої не ставали вторинними джерелами забруднення. Це особливо актуально для систем, що працюють у регіонах з історичними чи потенційними радіаційними ризиками, включаючи зони відчуження чи промислові зони з використанням джерел випромінювання.

Лише за такого комплексного підходу інтелектуальні системи здатні повною мірою виконувати свої функції, захищаючи населення та навколишнє середовище «розумного міста».

4.2 Умови праці працівників ІТ-галузі

Даний параграф присвячено дослідженню умов діяльності фахівців, які створюють алгоритмічні засоби периферійних обчислень для обробки великих даних «розумних міст». Створення та впровадження високотехнологічних методів керування для різнотипових територіально розподілених застосунків і систем є неможливим без залучення складного інформаційно-комунікаційного інструментарію. Хоча електронно-обчислювальні технології вже давно є невіддільною частиною життєдіяльності суспільства, процес оптимізації умов праці розробників інтелектуальних систем в Україні все ще перебуває на стадії активного реформування.

Діяльність у сфері проектування програмного забезпечення, попри її високу затребуваність, характеризується наявністю низки чинників, що здатні чинити деструктивний вплив на здоров'я людини в разі порушення правил безпеки. Постійна концентрація на виконанні алгоритмічних завдань, розмивання меж між професійним та особистим часом, а також інтенсивне інтелектуальне навантаження призводять до психоемоційної перевтоми та виснаження організму. На відміну від практично необмежених можливостей електронно-обчислювальних машин, людський мозок має жорсткі фізіологічні обмеження (див. таблицю 4.1).

Таблиця 4.1 – Порівняльна характеристика персональних електронно-обчислювальних машин (ПЕОМ) та людини

Характеристики ПЕОМ	Властивості людини
1	2
Сучасні обчислювальні системи надають широкі можливості для автоматизації рутинних операцій, гнучкого вибору параметрів обробки даних та регулювання точності математичних розрахунків відповідно до поточних завдань.	Людський організм має обмежені обчислювальні можливості. Людина не здатна виконувати складні розрахунки з великими даними з високою швидкістю, а тривала праця зумовлює появу помилок і зниження достовірності результатів.

Продовження таблиці 4.1

1	2
Математичні моделі штучного інтелекту демонструють високу адаптивність до мінливих умов середовища, здатність до узагальнення інформації на основі обмежених вибірок при збереженні стабільності базових системних властивостей.	Здатність людини розв'язувати складні логічні завдання обмежена набутим практичним досвідом, віком та рівнем кваліфікації. З віком швидкість реакції та гострота мислення можуть поступово знижуватися.
Програмні та апаратні комплекси функціонують безвідносно до внутрішніх чинників мотивації та зберігають сталу продуктивність у межах заданого технічного регламенту.	Особи, орієнтовані на високу результативність праці, є чутливими до психологічного клімату та ергономічних параметрів робочого простору. Для збереження їхньої мотивації необхідна періодична зміна умов діяльності.

Ефективність сприйняття та аналізу великих масивів інформації людиною стрімко знижується під впливом тривалого монотонного навантаження. Продуктивність розумової діяльності залежить від сукупності чинників, включаючи тривалість сну, раціональність харчування та загальний стан здоров'я [62]. Для підтримання високого рівня працездатності інженера-дослідника необхідно забезпечити такі параметри середовища:

- Температурний режим: тривале перебування у приміщеннях із надмірно високими або низькими температурами є неприпустимим і потребує штучного мікрокліматичного регулювання;

- Вміст кисню в повітрі: нормальне функціонування центральної нервової системи та внутрішніх органів можливе лише за умов ефективної припливно-витяжної вентиляції;

- Харчовий раціон: надходження поживних речовин, мінералів та вітамінів забезпечує відновлення енергетичних витрат організму;

- Регламентований відпочинок: періодичні перерви та повноцінний сон необхідні для регенерації психофізіологічних ресурсів;

– Відсутність токсичних чинників: виключення впливу забрудненого атмосферного повітря та шкідливих звичок запобігає передчасному зниженню працездатності [63].

Кількісне співвідношення окремих експлуатаційних параметрів людини та обчислювальної техніки наведено в таблиці 6.2 [63].

Таблиця 6.2 – Порівняльні дані окремих характеристик людини та ПЕОМ

Показники ефективності	Людина	ПЕОМ
Імовірність помилкових дій, відносні одиниці	10^{-2}	10^{-6}
Середній час виконання елементарної операції, секунд	0,4	10^{-2} - 10^{-3}
Час звернення до внутрішньої пам'яті, секунд	10^{-2} - 10^2	10^{-8} - 10^{-2}
Тривалість утримання інформації в оперативній пам'яті	3 секунди	Тисячі годин

Традиційні, жорстко регламентовані робочі місця операторів поступово замінюються сучасними ергономічними просторами, що поєднують зони для напруженої інтелектуальної праці та короткочасного відпочинку. Спеціалізовані кімнати психологічного розвантаження стали невіддільною складовою інженерних центрів, оскільки вони сприяють оптимізації емоційного стану та підвищенню продуктивності праці.

Сучасні підприємства впроваджують нестандартні архітектурно-планувальні рішення для робочих приміщень, які не лише забезпечують належний комфорт, а й стимулюють креативне мислення розробників. Створення оригінальних просторових конфігурацій (наприклад, тематичних модульних зон або реконструйованих історичних споруд) дає змогу мінімізувати відчуття монотонності праці та сформувати сприятливе творче середовище.

Особлива увага приділяється збереженню фізичного здоров'я персоналу. Інфраструктура сучасних науково-дослідних центрів часто включає спортивні зали, зони для занять лікувальною фізкультурою та ігрові кімнати. Це дає

працівникам можливість оперативно знімати м'язову напругу та підтримувати необхідний рівень рухової активності безпосередньо в межах установи.

Задоволення потреб персоналу у комфортному та диверсифікованому середовищі є вагомим чинником успішного менеджменту. Забезпечення можливості для фізичного розвантаження сприяє підвищенню загальної задоволеності трудовою діяльністю. Як наслідок, установи, що створюють такі умови, отримують суттєве зростання лояльності та продуктивності праці своїх співробітників [64].

Тривале перебування у сидячому положенні, притаманне розробникам алгоритмічного забезпечення, часто викликає суб'єктивне відчуття втоми наприкінці робочої зміни. Проте цей стан не завжди свідчить про глибокі патологічні зміни чи повне виснаження. Регулярні дозовані фізичні навантаження під час перерв дозволяють ліквідувати явища застою в системі кровообігу та відновити сили. Тому фахівці з обробки великих даних часто обирають активний відпочинок як засіб компенсації гіподинамії.

Діяльність інженера-програміста супроводжується безперервним впливом комплексу несприятливих виробничих чинників. До них належать фізичні фактори (підвищений рівень шуму від охолоджувальних систем, нераціональне або недостатнє освітлення робочих поверхонь, наявність протягів), а також специфічні загрози, зумовлені тривалою роботою з моніторами та мікропроцесорною технікою, зокрема електромагнітне випромінювання та значне зорове навантаження.

Умови праці розробників мають безпосередній детермінуючий вплив на якість та надійність створюваних алгоритмічних засобів периферійних обчислень для «розумних міст». Процеси математичного моделювання, архітектурного проектування децентралізованих мереж та безперебійної підтримки систем обробки великих даних критично залежать від психофізіологічного стану фахівців.

4.3 Висновок до четвертого розділу

В четвертому розділі кваліфікаційної роботи описано захист людини від іонізуючих випромінювань. Розглянуто умови праці працівників ІТ-галузі.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз алгоритмічних засобів периферійних обчислень засвідчив, що застосування багатокритеріальної оптимізації, інтелектуального керування ресурсами та механізмів забезпечення надійності дає змогу підвищити ефективність, енергоощадність, безпеку й оперативність обробки великих даних у системах «розумного міста».

В першому розділі кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Бакалавр»:

- Розглянуто периферійні обчислення як інструмент управління ресурсами критично важливих застосувань «розумних міст».

- Проведено систематизацію алгоритмічних засобів розподілу ресурсів у периферійних мережах.

- Проаналізовано архітектурні характеристики периферійних обчислювальних платформ та функціональних вимірів розміщення завдань.

- Подано структурно-порівняльний аналіз парадигм і моделей розвантаження периферійних обчислювальних мереж.

- Висвітлено теоретичні засади та концептуальні основи периферійних обчислень у критично важливих застосуваннях.

- Досліджено критично важливі застосунки периферійних обчислень.

В другому розділі кваліфікаційної роботи:

- Досліджено алгоритми енергоефективного управління ресурсами периферійних обчислень у системах «розумного міста».

- Проаналізовано алгоритмічні засоби мінімізації затримок обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних у периферійних мережах «розумного міста».

- Здійснено аналіз методів забезпечення надійності та відмовостійкості периферійних обчислювальних систем у середовищі «розумного міста».

- Розглянуто математичні моделі та алгоритмічні засоби багатокритеріальної оптимізації периферійної інфраструктури «розумного міста».

– Досліджено алгоритмічні засоби інтелектуального керування ресурсами периферійних систем з урахуванням мобільності сервісів «розумного міста».

– Проаналізовано алгоритмічні засоби забезпечення доступності великих за обсягом наборів та колекцій даних та оптимізації реплікації у периферійній інфраструктурі «розумного міста».

– Розглянуто алгоритмічні засоби забезпечення відмовостійкості та надійності обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних у периферійному середовищі «розумного міста».

В третьому розділі кваліфікаційної роботи:

– Досліджено математичні моделі та алгоритми динамічного планування завдань у туманно-периферійних мережах.

– Здійснено класифікацію та аналіз математичних методів багатокритеріальної оптимізації периферійних обчислювальних систем.

– Проведено систематизацію дослідницьких прогалин та визначення напрямків оптимізації периферійних обчислень «розумного міста».

– Розглянуто алгоритмічні засоби багатокритеріальної оптимізації та забезпечення відмовостійкості периферійних обчислень «розумного міста».

– Проаналізовано алгоритми забезпечення відмовостійкості та безперервності сервісів у хмарно-периферійних архітектурах міських мереж.

– Досліджено алгоритмічні засоби енергоефективного управління та балансування навантаження в гетерогенному периферійному середовищі «розумного міста».

– Розглянуто алгоритмічні засоби забезпечення безпеки даних та підтримки мобільності вузлів у периферійній інфраструктурі «розумного міста».

У розділі «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» описано захист людини від іонізуючих випромінювань. Розглянуто умови праці працівників ІТ-галузі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

- 1 Duda O., Matsiuk O., Kunanets N., Pasichnyk V., Rzhеuskyi A., Bilak Y. Formation of hypercubes based on data obtained from IoT devices // *International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control*. 2021. Vol. 11(5). P. 498–504. DOI: 10.2174/2210327910999201210145151.
- 2 Orlov M. V., Duda O. M., Zhovnir Y. I., Hrybovskyi O. M. DevOps tools in IoT systems // *Комп'ютерно-інтегровані технології*. 2024. Vol. 57. P. 128–138. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2024-57-15.
- 3 Luchkevych M., Shakleina I., Duda O. The impact of modern cloud technologies on the efficiency of DevOps processes // *Scientific Journal TNTU*. 2025. No. 1(117). P. 112–122. DOI: 10.33108/visnyk_tntu2025.01.
- 4 Orlov M. V., Hrybovskyi O. M., Zhovnir Y. I., Duda O. M. DevOps methodology in IoT ecosystems // *Вчені записки ТНУ*. 2024. Vol. 35(6). P. 163–170. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.6.2/22.
- 5 Rasouli, Nayereh, Cristian Klein, and Erik Elmroth. "Resource management for mission-critical applications in edge computing: systematic review on recent research and open issues." *ACM Computing Surveys* 58.3 (2025): 1-37.
- 6 Ankur Utsav, Amit Abhishek, P. Suraj, and Ritesh Kr. Badhai. 2021. An IoT based UAV network for military applications. In 2021 Sixth International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET). 122–125. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/WiSPNET51692.2021.9419470>.
- 7 Tzu-Wei Lin. 2022. A privacy-preserved id-based secure communication scheme in 5G-IoT telemedicine systems. *Sensors* 22, 18 (Jan. 2022), 6838. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/s22186838>.
- 8 Zhovnir Y. I., Hrybovskyi O. M., Orlov M. V., Duda O. M., Kunanets N. E. IoT information systems methodology // *Управління розвитком складних систем*. 2024. Vol. 60. P. 56–71. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.60.56-70.

9 Shuchen Zhou, Waqas Jadoon, and Iftikhar Khan. 2023. Computing offloading strategy in mobile edge computing environment: A comparison between adopted frameworks, challenges, and future directions. *Electronics* 12 (May 2023), 2452. DOI:<http://dx.doi.org/10.3390/electronics12112452>.

10 Ramesh Singh, Radhika Sukapuram, and Suchetana Chakraborty. 2023. A survey of mobility-aware multi-access edge computing: Challenges, use cases and future directions. *Ad Hoc Networks* 140 (March 2023), 103044. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.103044>.

11 Nina Santi and Nathalie Mitton. 2021. A resource management survey for mission critical and time critical applications in multi access edge computing. *ITU Journal on Future and Evolving Technologies* 2, 2 (Nov. 2021). Retrieved from <https://hal.science/hal-03420193>.

12 Duda O., Zakharia O., Kramar T., Melnyk A., Skaletskyi P. Data mesh smart city architecture // Вісник НУ «Львівська політехніка». 2025. Vol. 17. P. 411–424. DOI: 10.23939/sisn2025.17.411.

13 Mostafa Raeisi-Varzaneh, Omar Dakkak, Adib Habbal, and Byung-Seo Kim. 2023. Resource scheduling in edge computing: Architecture, taxonomy, open issues and future research directions. *IEEE Access* 11 (2023), 25329–25350. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3256522>.

14 Quyuan Luo, Shihong Hu, Changle Li, Guanghui Li, and Weisong Shi. 2021. Resource Scheduling in Edge Computing: Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 23, 4 (2021), 2131–2165. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2021.3106401>.

15 Ling Hou, Mark A. Gregory, and Shuo Li. 2022. A survey of multi-access edge computing and vehicular networking. *IEEE Access* 10 (2022), 123436–123451. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3224032>.

16 Zeinab Zabihi, Amir Masoud Eftekhari Moghadam, and Mohammad Hossein Rezvani. 2023. Reinforcement learning methods for computing offloading: A systematic review. *Comput. Surveys* (June 2023), 3603703. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/3603703>.

17 Ning Lyu. 2021. Brief review on computing resource allocation algorithms in mobile edge computing. In 2021 2nd International Conference on Computing and Data Science (CDS). 108–111. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/CDS52072.2021.00025>.

18 The European Parliament and The Council of the European Union. 2022. Directive of the European Parliament and of the Council on the resilience of critical entities and repealing Council Directive 2008/114/EC. (2022). Retrieved 30 November 2022 from <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-51-2022-INIT/en/pdf>.

19 Doru Calin. 2023. A short overview of mission critical communications technologies for the rail industry. *IEEE Wireless Communications* 30, 3 (June 2023), 6–8. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/MWC.2023.10183806>.

20 Yue Wang, Tao Yu, and Kei Sakaguchi. 2021. Context-based MEC platform for augmented-reality services in 5G networks. In 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall). 1–5. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625304>.

21 Sujie Shao, Lili Su, Qinghang Zhang, Shuang Wu, Shaoyong Guo, and Feng Qi. 2023. Multi task dynamic edge– end computing collaboration for urban Internet of Vehicles. *Computer Networks* 227 (May 2023), 109690. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109690>.

22 Duda O., Kunanets N., Matsiuk O., Pasichnyk V., Rzhеuskyi A. Aggregation, Storing, Multidimensional Representation and Processing of COVID-19 Data // *Advances in Intelligent Systems and Computing V. CSIT 2020*. Springer, Cham, 2021. Vol. 1293. DOI: 10.1007/978-3-030-63270-0_60. ISSN 2194-5357, EISSN 2194-5365.

23 Jiangjiang Zhang, Bei Gong, Muhammad Waqas, Shanshan Tu, and Zhu Han. 2023. A hybrid many-objective optimization algorithm for task offloading and resource allocation in multi-server mobile edge computing networks. *IEEE Transactions on Services Computing* (2023), 1–14. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/TSC.2023.3268990>.

24 Sardar Khaliq uz Zaman, Ali Imran Jehangiri, Tahir Maqsood, Nuhman ul Haq, Arif Iqbal Umar, Junaid Shuja, Zulfiqar Ahmad, Imed Ben Dhaou, and Mohammed F. Alsharekh. 2023. LiMPO: Lightweight mobility prediction and offloading framework using machine learning for mobile edge computing. *Cluster Computing* 26, 1 (Feb. 2023), 99–117. DOI:<http://dx.doi.org/10.1007/s10586-021-03518-7>.

25 Sanaa Almasri, Moath Jarrah, and Basheer Al-Duwairi. 2022. Multi-objective optimization of task assignment in distributed mobile edge computing. *Journal of Reliable Intelligent Environments* 8, 1 (March 2022), 21–33. DOI:<http://dx.doi.org/10.1007/s40860-021-00162-1>.

26 Chit Wutyee Zaw, Shashi Raj Pandey, Kitae Kim, and Choong Seon Hong. 2021. Energy-aware resource management for federated learning in multi-access edge computing systems. *IEEE Access* 9 (2021), 34938–34950. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3055523>.

27 Duda O., Kunanets N., Martsenko S., Nykytyuk V., Pasichnyk V. COVID-19 data collections and processing // *IEEE CSIT* 2021. P. 252–257. DOI: [10.1109/CSIT52700.2021.9648658](http://dx.doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648658).

28 Yumei Li, Xiumin Zhu, Shudian Song, Shuyue Ma, Feng Yang, and Linbo Zhai. 2023. Task offloading and parameters optimization of MAR in multi-access edge computing. *Expert Systems with Applications* 215 (April 2023), 119379. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119379>.

29 Shangguang Wang, Yan Guo, Ning Zhang, Peng Yang, Ao Zhou, and Xuemin Shen. 2021. Delay-aware microservice coordination in mobile edge computing: A reinforcement learning approach. *IEEE Transactions on Mobile Computing* 20, 3 (March 2021), 939–951. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/TMC.2019.2957804>.

30 Md Delowar Hossain, Luan N. T. Huynh, Tangina Sultana, Tri D.T. Nguyen, Jae Ho Park, Choong Seon Hong, and Eui-Nam Huh. 2020. Collaborative task offloading for overloaded mobile edge computing in small-cell networks. In

2020 International Conference on Information Networking (ICOIN). 717–722. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/ICOIN48656.2020.9016452>.

31 Zhihan Lv and Liang Qiao. 2020. Optimization of collaborative resource allocation for mobile edge computing. *Computer Communications* 161 (Sept. 2020), 19–27. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2020.07.022>.

32 Raphael Eidenbenz, Yvonne-Anne Pignolet, and Alain Ryser. 2020. Latency-aware industrial fog application orchestration with kubernetes. In 2020 Fifth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC). 164–171. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/FMEC49853.2020.9144934>.

33 Jingxian Liu, Yitian Wang, Wei Zhang, and Kangxu Tian. 2023. A novel offloading and resource allocation scheme for time-critical tasks in heterogeneous internet of vehicles. In 2023 2nd International Conference for Innovation in Technology (INOCON). 1–7. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/INOCON57975.2023.10101035>.

34 Sa Math, Prohim Tam, Dae-Young Kim, and Seokhoon Kim. 2022. Intelligent offloading decision and resource allocations schemes based on RNN/DQN for reliability assurance in software-defined massive machine-type communications. *Security and Communication Networks* 2022 (April 2022), e4289216. DOI:<http://dx.doi.org/10.1155/2022/4289216>.

35 Lu Zhao, Bo Li, Wenan Tan, Guangming Cui, Qiang He, Xiaolong Xu, Lida Xu, and Yun Yang. 2022. Joint coverage reliability for budgeted edge application deployment in mobile edge computing environment. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* 33, 12 (Dec. 2022), 3760–3771. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/TPDS.2022.3166163>.

36 Chanh Nguyen, Cristian Klein, and Erik Elmroth. 2020. Elasticity control for latency-intolerant mobile edge applications. In 2020 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC). IEEE, 70–83.

37 Salman Raza, Wei Liu, Manzoor Ahmed, Muhammad Rizwan Anwar, Muhammad Azyed Mirza, Qibo Sun, and Shangguang Wang. 2020. An efficient task

offloading scheme in vehicular edge computing. *Journal of Cloud Computing* 9, 1 (June 2020), 28. DOI:<http://dx.doi.org/10.1186/s13677-020-00175-w>.

38 Jianbo Du, Yan Sun, Ning Zhang, Zehui Xiong, Aijing Sun, and Zhiguo Ding. 2023. Cost-effective task offloading in NOMA-enabled vehicular mobile edge computing. *IEEE Systems Journal* 17, 1 (March 2023), 928–939. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/JSYST.2022.3167901>.

39 Xiao Ma, Shangguang Wang, Shan Zhang, Peng Yang, Chuang Lin, and Xuemin Shen. 2021. Cost-efficient resource provisioning for dynamic requests in cloud assisted mobile edge computing. *IEEE Transactions on Cloud Computing* 9, 3 (July 2021), 968–980. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/TCC.2019.2903240>.

40 Eugen Słapak, Juraj Gazda, Weiqiang Guo, Taras Maksymyuk, and Mischa Dohler. 2021. Cost-effective resource allocation for multitier mobile edge computing in 5G mobile networks. *IEEE Access* 9 (2021), 28658–28672. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3059029>.

41 Ran Bi, Ting Peng, Jiankang Ren, Xiaolin Fang, and Guozhen Tan. 2022. Joint service placement and computation scheduling in edge clouds. In *2022 IEEE International Conference on Web Services (ICWS)*. IEEE, 47–56.

42 Yanling Shao, Chunlin Li, Zhao Fu, Leyue Jia, and Youlong Luo. 2019. Cost-effective replication management and scheduling in edge computing. *Journal of Network and Computer Applications* 129 (March 2019), 46–61. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2019.01.001>.

43 Wei Wang, Yongmin Zhang, Rui Huang, Ju Ren, Feng Lyu, and Yaoyue Zhang. 2023. Efficient resource management and expansion scheme for collaborative edge-cloud computing. *IEEE Transactions on Mobile Computing* (2023), 1–15. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/TMC.2023.3267497>.

44 Shanchen Pang, Nuanlai Wang, Min Wang, Sibao Qiao, Xue Zhai, and Neal N. Xiong. 2021. A smart network resource management system for high mobility edge computing in 5G internet of vehicles. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering* 8, 4 (2021), 3179–3191.

45 Xenofon Vasilakos, Walter Featherstone, Navdeep Uniyal, Anderson Bravalheri, Abubakar Siddique Muqaddas, Navid Solhjo, Daniel Warren, Shadi Moazzeni, Reza Nejabati, and Dimitra Simeonidou. 2020. Towards zero downtime edge application mobility for ultra-low latency 5G streaming. In 2020 IEEE Cloud Summit. 25–32. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/IEEECloudSummit48914.2020.00010>.

46 Wenhan Zhan, Chunbo Luo, Geyong Min, Chao Wang, Qingxin Zhu, and Hancong Duan. 2020. Mobility-aware multi-user offloading optimization for mobile edge computing. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 69, 3 (March 2020), 3341–3356. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2020.2966500>.

47 Marco Marcozzi, Orhan Gemikonakli, Eser Gemikonakli, Enver Ever, and Leonardo Mostarda. 2023. Availability Evaluation of IoT Systems with Byzantine Fault-Tolerance for Mission-critical Applications. (June 2023). arXiv:2305.09262. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2305.09262>.

48 Muhammad Mudassar, Yanlong Zhai, and Liao Lejian. 2022. Adaptive fault-tolerant strategy for latency-aware IoT application executing in edge computing environment. *IEEE Internet of Things Journal* 9, 15 (Aug. 2022), 13250–13262. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2022.3144026>.

49 Roozbeh Siyadatzadeh, Fatemeh Mehrafrooz, Mohsen Ansari, Bardia Safaei, Muhammad Shafique, Jörg Henkel, and Alireza Ejlali. 2023. ReLIEF: A reinforcement-learning-based real-time task assignment strategy in emerging fault-tolerant fog computing. *IEEE Internet of Things Journal* 10, 12 (June 2023), 10752–10763. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2023.3240007>.

50 Kaniyambakkam Elayavilli Srinivasa Desikan, Vijeth J. Kotagi, and C. Siva Ram Murthy. 2023. Decoding the interplay between latency, reliability, cost, and energy while provisioning resources in fog-computing-enabled IoT networks. *IEEE Internet of Things Journal* 10, 3 (Feb. 2023), 2404–2416. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2022.3211872>.

51 Taha Alfakih, Mohammad Mehedi Hassan, and Muna Al-Razgan. 2021. Multi-objective accelerated particle swarm optimization with dynamic programming

technique for resource allocation in mobile edge computing. *IEEE Access* 9 (2021), 167503–167520. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3134941>.

52 Shinu M. Rajagopal, M. Supriya, and Rajkumar Buyya. 2023. Resource provisioning using meta-heuristic methods for IoT microservices with mobility management. *IEEE Access* 11 (2023), 60915–60938. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3281348>.

53 Abdullah Lakhan, Muhammad Suleman Memon, Qurat-ul-ain Mastoi, Mohamed Elhoseny, Mazin Abed Mohammed, Mumtaz Qabulio, and Mohamed Abdel-Basset. 2022. Cost-efficient mobility offloading and task scheduling for microservices IoVT applications in container-based fog cloud network. *Cluster Computing* 25, 3 (June 2022), 2061–2083. DOI:<http://dx.doi.org/10.1007/s10586-021-03333-0>.

54 István Pelle, Márk Szalay, János Czentye, Balázs Sonkoly, and László Toka. 2022. Cost and Latency Optimized Edge Computing Platform. *Electronics* 11, 4 (Jan. 2022), 561. DOI:<http://dx.doi.org/10.3390/electronics11040561>.

55 Muhammad Zakarya, Lee Gillam, Hashim Ali, Izaz Ur Rahman, Khaled Salah, Rahim Khan, Omer Rana, and Rajkumar Buyya. 2022. epcAware: A game-based, energy, performance and cost-efficient resource management technique for multi-access edge computing. *IEEE Transactions on Services Computing* 15, 3 (May 2022), 1634–1648. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/TSC.2020.3005347>.

56 Yaser Ramzanpoor, Mirsaeid Hosseini Shirvani, and Mehdi Golsorkhtabaramiri. 2022. Multi-objective fault-tolerant optimization algorithm for deployment of IoT applications on fog computing infrastructure. *Complex & Intelligent Systems* 8, 1 (Feb. 2022), 361–392. DOI:<http://dx.doi.org/10.1007/s40747-021-00368-z>.

57 Umber Saleem, Yu Liu, Sobia Jangsher, Yong Li, and Tao Jiang. 2021. Mobility-aware joint task scheduling and resource allocation for cooperative mobile edge computing. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 20, 1 (Jan. 2021), 360–374. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/TWC.2020.3024538>.

58 Khaled M. Matrouk and Amer D. Matrouk. 2023. Mobility aware-task scheduling and virtual fog for offloading in IoT-fog-cloud environment. *Wireless Personal Communications* 130, 2 (May 2023), 801–836. DOI:<http://dx.doi.org/10.1007/s11277-023-10310-w>.

59 Yuan Liao and Vasilis Friderikos. 2023. Optimal deployment and operation of robotic aerial 6 G small cells with grasping end effectors. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (2023), 1–13. DOI:<http://dx.doi.org/10.1109/TVT.2023.3269906>.

60 Cisco Systems. IoT Threat Defense for Manufacturing SAFE. Design & Implementation Guide. Cisco White Paper, v1.0, 2021. 131 p.

61 78% of US consumers demand businesses do more to protect data, IBM survey finds – WRALTechWire, 2018.

62 Стручок В.С. Техноекоелогія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека». Навчальний посібник. 2022.

63 Вовк, Андрій Іванович. Методика організації роботи розподіленої Agile команди у великих ІТ-проектах. MS thesis. 2020.

64 СЬОГОДНІ UA. <https://www.segodnya.ua/lifestyle/fun/pochti-kak-u-google-chemudivlyayut-ofisy-ukrainskih-it-kompaniy--764025.html>.