

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Інтелектуальні системи та мережі інтернету медичних речей. Технології
периферійних обчислень в системах ІоМТ»

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТСМ-23м
спеціальності 172 – Електронні комунікації
та радіотехніка

dm Бойко А.В.

Керівник: к.т.н., доцент каф. ІКСТ
МЗ Васильківський М.В.
«16» 12 2024 р.

Опонент: к.т.н., доцент каф. ІРТС
Роса Осадчук Я.О.
«16» 12 2024 р.

Допущено до захисту
Завідуючий кафедри ІКСТ
Кичак В.М.
д.т.н., проф. Кичак В.М.
«16» 12 2024 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань - 17- Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
(шифр і назва)
Спеціальність - 172 - Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

"24" 09 2024 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Бойку Анатолію Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Інтелектуальні системи та мережі інтернету медичних речей. Технології периферійних обчислень в системах IoT

керівник роботи Васильківський Микола Володимирович, канд. техн. наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "17" 09 2024 року № 310

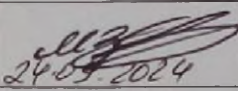
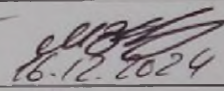
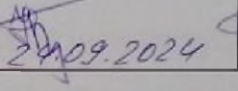
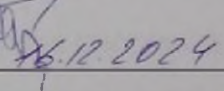
2. Строк подання студентом роботи 09 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи затримка передачі даних без периферійних обчислень (у хмарних середовищах залежно від віддаленості серверів): 100-200 мс; затримка передачі даних з периферійними обчисленнями (завдяки локальній обробці даних): 10-30 мс; економія пропускну здатності (лише попередньо оброблені дані передаються до хмарних центрів) до 40-60%; обсяг даних, що генерується одним пристроєм IoT: 100-500 МБ на день; зниження обсягу передачі до хмари після локальної обробки: до 70-90%; зменшення енергоспоживання периферійних пристроїв (завдяки оптимізації обробки даних та скороченню передачі великих обсягів інформації) на 15-25%; підвищення швидкості обробки даних (порівняно з традиційними централізованими системами) на 30-50%; збільшення стійкості системи до перебоїв у зв'язку з хмарними серверами (критичні функції виконуються локально) на 90%; кількість оброблюваних пристроїв на вузол периферійних обчислень (залежно від потужності вузла): до 100-500 пристроїв IoT на один периферійний сервер; зниження ризику компрометації даних (важливі медичні дані не передаються у відкриті мережі) на 70%; зниження витрат на обробку даних у хмарі (при локальній обробці) на 30-40%; частота моніторингу параметрів в реальному часі (при використанні периферійних обчислень) 1-10 секунд; пропускну здатність локальної мережі IoT: до 1 Гбіт/с; кількість підтримуваних пристроїв у системі IoT: до 10 000 на 1 км².

4. Зміст текстової частини: телекомунікаційні системи на основі IoT; архітектура апаратного забезпечення для пристроїв периферійних обчислень; конвергентна мережева архітектура 5G та MEC; особливості застосування інтелектуального інтерфейсу в середовищі інтернету речей; економічна частина.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
архітектура промислового Інтернету речей з хмарними, туманними та периферійними обчисленнями; загальна архітектура системи IoT; одноядерна та багатоядерна архітектури процесорного блоку системи IoT; структура периферійних обчислень з багаторазовим доступом в мережі 5G; багаторівнева сервіс-орієнтована архітектура для 5G MEC; конвергентна мережева архітектура 5G і MEC; класифікація систем VCI; загальна архітектура інтерфейсу «мозок-комп'ютер; архітектура системи IoMT; архітектура системи IoT з глибоким навчанням; структура сегменту мережі IoMT.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Васильківський М.В., доцент кафедри ІКСТ	 24.09.2024	 16.12.2024
Економічна частина		 24.09.2024	 16.12.2024

7. Дата видачі завдання 02 вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

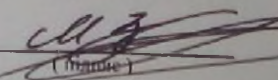
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	09.09.2024р.	
2.	Телекомунікаційні системи на основі IoMT	16.09.2024р.	
3.	Архітектура апаратного забезпечення для пристроїв периферійних обчислень	12.10.2024р.	
4.	Конвергентна мережева архітектура 5G та MEC	30.10.2024р.	
5.	Особливості застосування інтелектуального інтерфейсу в середовищі інтернету речей	11.11.2024р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	22.11.2024р.	
7.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	02.12.2024р.	
8.	Нормоконтроль МКР	06.12.2024р.	
9.	Попередній захист МКР, опонування МКР	14.12.2024р.	
10.	Захист МКР ЕК	18.12.2024р.	

Студент


(підпис)

Бойко А. В.

Керівник роботи


(підпис)

Васильківський М.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Бойко А.В. Інтелектуальні системи та мережі інтернету медичних речей. Технології периферійних обчислень в системах ІоМТ. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – електронні комунікації та радіотехніка, освітня програма – телекомунікаційні системи та мережі. Вінниця: ВНТУ, 2024. 124 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 60 назв; рис.: 33; табл. 6.

У роботі досліджено принципи функціонування інтелектуальних систем та мереж Інтернету медичних речей (ІоМТ). Особливу увагу приділено впровадженню технологій периферійних обчислень, які забезпечують швидку та ефективну обробку даних безпосередньо на периферії мережі. Проаналізовано вплив цих технологій на зменшення затримок, оптимізацію використання мережевих ресурсів і підвищення рівня безпеки даних. Представлено практичні аспекти інтеграції периферійних обчислень з ІоМТ для моніторингу стану здоров'я пацієнтів, управління медичними пристроями та створення персоналізованих рішень. Розглянуто основні виклики та перспективи впровадження таких технологій у медичній сфері.

Метою роботи є дослідження принципів побудови та функціонування інтелектуальних систем і мереж Інтернету медичних речей (ІоМТ) з акцентом на впровадження технологій периферійних обчислень. Завданням є розробка підходів для оптимізації обробки медичних даних у реальному часі, підвищення ефективності роботи систем ІоМТ, забезпечення їхньої безпеки та надійності, а також створення умов для персоналізованого медичного обслуговування завдяки інтеграції інноваційних технологій обробки даних.

Основними завданнями наукової роботи є: аналіз принципів функціонування та можливостей застосування ІоМТ для забезпечення

моніторингу здоров'я, збору, передачі та обробки медичних даних; визначення вимог до апаратної частини ІоМТ-пристроїв та розробка оптимальних рішень для забезпечення високої продуктивності та енергоефективності; аналіз інтеграції технологій 5G і мобільних периферійних обчислень (MEC) для підтримки ІоМТ-систем із забезпеченням низької затримки та високої надійності зв'язку; розробка інтерфейсів для взаємодії користувачів з ІоМТ-системами, що базуються на штучному інтелекті, з метою спрощення управління та покращення користувацького досвіду; проведення аналізу економічної доцільності впровадження ІоМТ-систем, оцінка вартості розробки, впровадження та експлуатації запропонованих рішень.

Робота містить п'ять розділів. У першому розділі проведено дослідження телекомунікаційних систем на основі ІоМТ. У другому розділі виконано аналіз архітектури апаратного забезпечення для пристроїв периферійних обчислень. У третьому розділі досліджено конвергентна мережева архітектура 5G та MEC. У четвертому розділі виконано обґрунтування доцільності застосування інтелектуального інтерфейсу в середовищі інтернету речей. У п'ятому розділі виконано економічне обґрунтування доцільності реалізації даної науково-дослідної роботи.

ABSTRACT

UDC 621.396

Boyko A.V. Intelligent systems and networks of the Internet of Medical Things. Edge computing technologies in IoMT systems. Master's qualification work in the specialty 172 - electronic communications and radio engineering, educational program - telecommunication systems and networks. Vinnytsia: VNTU, 2024. 124 c.

In Ukrainian. Bibliography: 60 titles; Figures: 33; Table 6.

The paper investigates the principles of functioning of intelligent systems and networks of the Internet of Medical Things (IoMT). Particular attention is paid to the introduction of edge computing technologies that provide fast and efficient data processing directly at the network periphery. The impact of these technologies on reducing delays, optimizing the use of network resources and increasing data security is analyzed. Practical aspects of integrating edge computing with IoMT for monitoring patient health, managing medical devices, and creating personalized solutions are presented. The main challenges and prospects for the introduction of such technologies in the medical field are considered.

The aim of the work is to study the principles of construction and operation of intelligent systems and networks of the Internet of Medical Things (IoMT) with an emphasis on the introduction of edge computing technologies. The task is to develop approaches to optimize real-time medical data processing, improve the efficiency of IoMT systems, ensure their safety and reliability, and create conditions for personalized medical care through the integration of innovative data processing technologies.

The main tasks of the research work are: analysis of the principles of functioning and possibilities of using IoMT to ensure health monitoring, collection, transmission and processing of medical data; determination of requirements for the hardware of IoMT devices and development of optimal solutions to ensure high performance and energy efficiency; analysis of the integration of 5G and mobile edge computing (MEC)

technologies to support IoMT systems with low latency and high reliability of communication; development of interfaces for user interaction with IoMT systems.

The paper consists of five chapters. The first section studies IoMT-based telecommunication systems. The second section analyzes the hardware architecture for edge computing devices. The third section investigates the converged network architecture of 5G and MEC. Section 4 justifies the feasibility of using an intelligent interface in the IoT environment. In the fifth section, the economic feasibility study of this research work is performed.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	9
1 ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ІОМТ.....	15
1.1 Застосування периферійних обчислень в інтелектуальних системах охорони здоров'я.....	15
1.2 Фреймворк для інтелектуальної системи охорони здоров'я на основі edge-IoMT.....	22
1.3 Перспективи периферійних обчислень для інтернету медичних речей.....	24
1.4 Висновки до розділу 1	28
2 АРХІТЕКТУРА АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРИСТРОЇВ ПЕРИФЕРІЙНИХ ОБЧИСЛЕНЬ.....	30
2.1 Базові концепції хмарної, туманної та периферійної обчислювальної інфраструктури.....	30
2.2 Роль периферійних обчислень в Інтернеті речей.....	36
2.3 Архітектура інтелектуальної системи ІоМТ	42
2.4 Особливості застосування периферійних обчислень для додатків у сфері охорони здоров'я.....	48
2.5 Висновки до розділу 2	56
3 КОНВЕРГЕНТНА МЕРЕЖЕВА АРХІТЕКТУРА 5G ТА МЕС	57
3.1 Технологічні можливості периферійних обчислень в мережах 5G з множинним доступом	57
3.2 Багаторівнева сервіс-орієнтована архітектура мережі 5G МЕС	60
3.3 Конвергентна мережева архітектура для 5G з МЕС.....	69
3.4 Інтеграція ІІІ і 5G для додатків у сфері охорони здоров'я з підтримкою МЕС	72
3.5 Висновки до розділу 3	74
4 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ІНТЕРФЕЙСУ В СЕРЕДОВИЩІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ.....	76

	5
4.1 Класифікація інтерфейсу «мозок-комп'ютер»	76
4.2 Ключові елементи інтелектуальних інтерфейсів ІоМТ.....	77
4.3 Інформаційна безпека інтелектуальних інтерфейсів.....	82
4.4 Висновки до розділу 4	85
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	87
5.1 Оцінювання наукового ефекту.....	87
5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	90
5.2.1 Витрати на оплату праці.....	91
5.2.2 Відрахування на соціальні заходи	94
5.2.3 Сировина та матеріали.....	95
5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	96
5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт	97
5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт	98
5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень	99
5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей	101
5.2.9 Службові відрядження.....	102
5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	102
5.2.11 Інші витрати.....	102
5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	103
5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи	104
5.4 Висновок до розділу 5.....	106
ВИСНОВКИ.....	107
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	109
Додаток А Ілюстративна частина	116
Додаток Б Протокол перевірки магістерської кваліфікаційної роботи	124

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ANFIS - адаптивна нейросистема нечіткого виводу
ANN - штучна нейронна мережа
AR - авторегресія
BCI - нейрокомп'ютерний інтерфейс
BLDA - байєсівський LDA
BMI - інтерфейс «мозок-машина»
BP - смугова потужність
BTC - система комунікації між мозком і речами
CCA - канонічний кореляційний аналіз
CNN - згорткові нейронні мережі
CSP - загальний просторовий патерн
C-RAN - хмарна мережа радіодоступу
DARPA - Агентство передових оборонних дослідницьких проєктів
DBSCAN - просторова кластеризація додатків із шумом на основі щільності
DL - глибоке навчання
ECoG - електрокортикографія
EH - збирання енергії
EMD - емпірична модова декомпозиція
ERP - потенціал, пов'язаний з подіями
ETSI - Європейський інститут телекомунікаційних стандартів
фMPT - функціональна магнітно-резонансна томографія
fNIRS - функціональна ближня інфрачервона спектроскопія
FFBPNN - нейронні мережі прямого поширення зі зворотним поширенням
FC - Туманні обчислення
FCN - туманні обчислювальні вузли
FPGA - польова програмована матриця вентилів
GAN - генеративна змагальна мережа
GPS - система глобального позиціонування

ICA - незалежний компонентний аналіз
IoMT - Інтернет медичних речей
IoT - інтернет речей
ITD - внутрішня декомпозиція шкали часу
ITR - інформаційна швидкість
LDA - лінійний дискримінантний аналіз
LSTM - довга короткочасна пам'ять
LVQ - квантування вектора навчання
MLNN - багатошарова нейронна мережа
MCC - Мобільні хмарні обчислення
NIRS - спектроскопія ближньої інфрачервоної області
NOMA - неортогональний множинний доступ
PNN - імовірнісна нейронна мережа
PSD - спектральна щільність потужності
RBF - радіально-базисна функція
RNN - рекурентна нейронна мережа
SQUID - надпровідні квантові інтерференційні пристрої
SSFT - короткочасне перетворення Фур'є
STNN - просторово-часова нейронна мережа
VR - віртуальна реальність
WPT - бездротова передача енергії
WPD - вейвлет-пакетна декомпозиція
WT - вейвлет-перетворення
БПЛА - безпілотні літальні апарати
БС – базова станція
Гц - герц
ЕЕГ - електроенцефалографія
кГц – кілогерц
МЕГ – магнітоенцефалографія
МРТ - магнітно-резонансна томографія

ПЕТ - позитронно-емісійна томографія

ЦОД – центр обробки даних

ЦС – центр сертифікації

ШПФ - швидке перетворення Фур'є

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток медичної галузі неможливо уявити без інтеграції передових інформаційних технологій. Інтелектуальні системи та мережі Інтернету медичних речей (ІоМТ) відкривають нові горизонти в забезпеченні діагностики, лікування та моніторингу стану пацієнтів. Особливої уваги заслуговують технології периферійних обчислень, які оптимізують роботу ІоМТ, забезпечуючи високу швидкість обробки даних, зниження затримок та підвищення рівня безпеки. У світі спостерігається експоненційне збільшення кількості носимих пристроїв, датчиків і систем моніторингу. Вони генерують величезний обсяг даних, який потребує ефективної обробки в реальному часі. ІоМТ дозволяє створювати рішення, адаптовані до індивідуальних потреб пацієнтів, що значно покращує якість медичних послуг. Традиційні хмарні обчислення часто мають затримки через передачу великих обсягів даних до центрів обробки. Технології периферійних обчислень переносять частину обчислювальних процесів ближче до джерела даних, знижуючи навантаження на хмару та мережу. Перенесення обчислень на периферію зменшує ризик передачі чутливих даних через глобальні мережі, що відповідає сучасним вимогам захисту інформації. Пандемії, старіння населення та збільшення хронічних захворювань вимагають нових підходів до моніторингу та обслуговування пацієнтів. Приклади застосування. Носимі пристрої збирають дані про пульс, рівень кисню в крові, температуру тощо, передаючи їх на локальні периферійні сервери для аналізу. Інтегровані системи ІоМТ оптимізують управління ресурсами, наприклад, відстеження місцезнаходження обладнання чи моніторинг стану пацієнтів у відділеннях інтенсивної терапії. Периферійні обчислення забезпечують низьку затримку при передачі відео, аудіо та медичних даних для дистанційних консультацій. Тема інтеграції інтелектуальних систем ІоМТ та технологій периферійних обчислень є надзвичайно актуальною в сучасному світі. Її розвиток дозволяє не лише покращити якість медичних послуг, але й знизити витрати та підвищити доступність медицини для широких

верств населення. Інноваційний потенціал цієї сфери має значний вплив на глобальну охорону здоров'я, відкриваючи перспективи для нових наукових досліджень і розробок.

Поява «розумної» системи охорони здоров'я створила нові можливості в медичній галузі, такі як медична діагностика, прогнозування, лікування та клінічні зустрічі пацієнтів з лікарем, що призвело до перегляду традиційних методів у системі охорони здоров'я [1]. Впровадження телемедицини та нових технологій цифрової охорони здоров'я різко зменшить кількість непотрібних клінічних візитів лікаря до пацієнта та допоможе в ранній діагностиці захворювань. Більше того, системи охорони здоров'я, орієнтовані на телемедицину та інтелектуальну систему охорони здоров'я, дозволять надавати медичні послуги в режимі реального часу та економічно ефективно, створюючи надзвичайно зручний час як для пацієнтів, так і для лікарів [2]. Система охорони здоров'я, яка залежить від Інтернету медичних речей (IoMT), допомагає людям і сприяє їхній життєво важливій повсякденній діяльності. Доступність і зручність використання IoMT почала революціонізувати медичні послуги. IoMT та пов'язані з ним технології стали найбільш популярними в галузі охорони здоров'я. В останні роки носяться технології на основі IoMT сприяли широкому використанню трансформації «розумних» систем охорони здоров'я [3, 4].

Крім того, телеоперації та обладнання з дистанційним керуванням стають життєздатним методом управління технологіями дистанційної медичної хірургії. Розумні платформи охорони здоров'я можуть зробити процедури медичної допомоги більш ефективними в часі, економічно вигідними та портативними, полегшуючи доступ до них навіть у найвіддаленіших районах [5].

Децентралізована база даних, яка може постійно підтримувати актуальну інформацію про пацієнтів, надає медичній галузі багато переваг. Коли різні сторони потребують доступу до однієї і тієї ж інформації, ці переваги стають особливо цікавими. Технологія периферійних обчислень може бути використана для створення додаткової цінності в інтелектуальній системі охорони здоров'я при догляді за літніми людьми, хронічними захворюваннями і в процесах

лікування. Залучення багатьох сторін до медичної системи спричинило серйозні проблеми, і цей величезний масив даних в системі охорони здоров'я порушив процес лікування пацієнтів.

Аналіз останніх досліджень. Розвиток інтелектуальних систем та IoMT (Internet of Medical Things) активно досліджується науковцями та інженерами. Зокрема, технології периферійних обчислень є одним із ключових елементів, що сприяє їх ефективності. Останні наукові роботи зосереджені на оптимізації, безпеці, масштабованості та інтеграції IoMT у сучасні медичні системи [6].

Дослідження [7] показують, що перенесення частини обчислень ближче до джерела даних значно скорочує затримки та покращує швидкість реакції систем. Наприклад, розроблені алгоритми для локальної обробки даних із носимих пристроїв дозволяють виявляти аномалії в стані пацієнта за мілісекунди. Використання периферійних обчислень дозволяє уникнути передачі великих обсягів даних до віддалених серверів, оптимізуючи використання пропускну здатності мережі. Багато дослідників [8] наголошують на перевагах обробки медичних даних на периферійних вузлах, що мінімізує ризик витоку інформації. У статтях [9] розглядаються підходи до використання блокчейн-технологій і диференційованої приватності для захисту даних у IoMT. Відзначається прогрес у розробці легковагових криптографічних методів, які не перевантажують периферійні пристрої. Використання технологій Federated Learning дозволяє тренувати ШІ без передачі сирих даних на центральні сервери. Це знижує ризик порушення конфіденційності.

У дослідженнях [10] активно впроваджуються моделі машинного навчання для виявлення таких станів, як серцеві аритмії, гіперглікемія або дихальні розлади, на основі даних, зібраних периферійними пристроями. Значна увага приділяється розробці енергоефективних алгоритмів, які дозволяють збільшити автономність пристроїв IoMT. Інноваційні підходи, такі як Harvesting Energy (збір енергії з довкілля), використовуються для периферійних вузлів [11].

Дослідження [12] демонструють, що впровадження 5G значно покращує можливості IoMT, забезпечуючи високу швидкість передачі даних і низькі

затримки для периферійних обчислень. У дослідженнях [13] розглядається використання AR у поєднанні з ІоМТ для хірургічних операцій і навчання медичного персоналу. Датчики для моніторингу стану пацієнтів з гіпертонією або діабетом, об'єднані з периферійними обчисленнями, дозволяють лікарям отримувати звіти в реальному часі [14]. Інтелектуальні рішення для моніторингу використання медичних ресурсів (ліжок, обладнання) на основі ІоМТ із локальним аналізом даних. Останні дослідження [6-14] свідчать, що впровадження інтелектуальних систем ІоМТ із периферійними обчисленнями має значний потенціал для трансформації медичної галузі, забезпечуючи точність, безпеку та оперативність у діагностиці та лікуванні.

Мета і завдання роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження та аналіз застосування технологій периферійних обчислень в інтелектуальних системах і мережах Інтернету медичних речей (ІоМТ) для підвищення ефективності обробки даних, забезпечення надійності, конфіденційності та швидкодії в медичних додатках. Особливу увагу приділено розробці підходів до інтеграції периферійних обчислень у ІоМТ для моніторингу стану здоров'я, управління медичними пристроями та реалізації персоналізованих медичних рішень.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

1. Виконати дослідження телекомунікаційних системи на основі ІоМТ;
2. Визначити архітектуру апаратного забезпечення для пристроїв периферійних обчислень;
3. Розробити конвергентну мережеву архітектуру 5G та MEC;
4. Проаналізувати застосування інтелектуального інтерфейсу в середовищі інтернету речей;
5. Розрахувати економічну ефективність розробки.

Об'єктом дослідження є інтелектуальні системи та мережі Інтернету медичних речей (ІоМТ), що включають технології збору, передачі та обробки медичних даних із застосуванням периферійних обчислень для забезпечення ефективності, безпеки та надійності медичних інформаційних систем.

Предметом дослідження є технології периферійних обчислень, архітектурні рішення, програмні та апаратні засоби, що забезпечують функціонування інтелектуальних систем і мереж Інтернету медичних речей (ІоМТ), а також методи оптимізації обробки медичних даних і взаємодії пристроїв у таких системах.

Методи досліджень базуються на використанні: методів теоретичного аналізу для вивчення наукових публікацій, нормативних документів та технічної літератури щодо інтелектуальних систем, ІоМТ та технологій периферійних обчислень; методів математичного моделювання для розробки моделей функціонування периферійних обчислень у системах ІоМТ для оцінки ефективності та продуктивності; методів експериментального моделювання для створення прототипів пристроїв ІоМТ та перевірка їх роботи в реальних або симульованих умовах; Методів системного аналізу для оцінювання архітектурних рішень та взаємодії компонентів ІоМТ-систем; методів програмної верифікації та тестування для перевірки коректності роботи програмного забезпечення, яке забезпечує функціонування ІоМТ та периферійних обчислень; методів економічного аналізу для оцінювання витрат і рентабельності впровадження ІоМТ-систем із застосуванням периферійних обчислень.

Новизна одержаних результатів:

1. Розроблено нові підходи до інтеграції телекомунікаційних систем з ІоМТ, що дозволяє підвищити ефективність передачі даних між медичними пристроями та інфраструктурою охорони здоров'я. Це забезпечує високу якість сервісів, мінімізацію затримок і надійність зв'язку в реальному часі.

2. Запропоновано інноваційну архітектуру апаратного забезпечення для пристроїв периферійних обчислень, яка дозволяє оптимізувати енергоспоживання, забезпечити інтеграцію з датчиками ІоМТ та підвищити продуктивність обробки даних. Рішення враховує вимоги компактності, масштабованості та довговічності пристроїв.

3. Створено нову конвергентну архітектуру, яка об'єднує можливості мереж 5G та периферійних обчислень (MEC) для ІоМТ. Це сприяє зниженню затримок, збільшенню пропускної здатності і підтримці високошвидкісного зв'язку для обробки великих обсягів медичних даних. Розробка дозволяє підвищити якість обслуговування пацієнтів у мобільному середовищі.

4. Вперше досліджено і реалізовано застосування інтелектуального інтерфейсу в ІоМТ, який використовує алгоритми машинного навчання для адаптації під користувача та автоматизації обробки даних. Це підвищує зручність взаємодії медичних працівників та пацієнтів із пристроями ІоМТ, сприяючи ефективнішому використанню системи.

5. Проведено детальний аналіз економічної ефективності впровадження ІоМТ з використанням периферійних обчислень. Визначено ключові переваги, такі як зниження витрат на обробку даних у централізованих системах, підвищення енергоефективності та зменшення витрат на обслуговування. Запропоновані моделі економічної оцінки допомагають обґрунтувати доцільність інвестицій у такі системи. Вказані результати мають значний науковий та практичний внесок, відкриваючи нові горизонти для впровадження інтелектуальних систем ІоМТ у сучасну медичну інфраструктуру.

Апробація роботи та її основні результати роботи проводилися на Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)» у 2024 році.

Публікації результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні положення кваліфікаційної роботи висвітлені у 2 тезах науково-технічної конференції.

1 ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ІОМТ

1.1 Застосування периферійних обчислень в інтелектуальних системах охорони здоров'я

Передача великих обсягів даних від пристроїв ІоМТ до хмарних центрів обробки створює затримки, що є критичними для додатків реального часу, таких як моніторинг життєвих показників пацієнтів. Велика кількість пристроїв ІоМТ спричиняє швидке заповнення каналів передачі даних. Хмарні обчислення переважно взаємодіють із пристроями через ІР-протокол, що створює труднощі для пристроїв, які використовують інші протоколи. Периферійні обчислення здійснюють локальну обробку даних поблизу пристроїв ІоМТ, що значно скорочує час передачі й обробки. Периферійні обчислення підтримують інтеграцію з різними протоколами пристроїв, що спрощує обробку даних. Локальна обробка дозволяє швидше аналізувати й структурувати дані, що особливо важливо для критичних додатків у медицині.

Периферійна архітектура стає проміжною ланкою, яка забезпечує ефективну взаємодію між пристроями ІоМТ і хмарними серверами. Менше навантаження на хмарні сервери та зниження витрат на передачу даних через мережу. Локальна обробка зменшує ризик втрати чи компрометації чутливих медичних даних під час їх передачі.

Попри схожість хмарних і периферійних обчислень, виникає бар'єр інтеграції, зумовлений різними технічними обмеженнями, такими як ємність зберігання, вимоги до швидкості обробки та обмеження мереж. Чутливі до затримок додатки, такі як медичний моніторинг у реальному часі, все ще стикаються з викликами в досягненні необхідного рівня затримки через архітектурні обмеження. Периферійні обчислення забезпечують критичні переваги для ІоМТ-систем, особливо в умовах, де затримка передачі даних або обмеження пропускної здатності можуть вплинути на ефективність медичних послуг. Їх використання дозволяє забезпечити безперебійну роботу ІоМТ,

підвищити безпеку, масштабованість і швидкість обробки даних. Проблеми, пов'язані з інтеграцією периферійних і хмарних обчислень, є важливим напрямком подальших досліджень для забезпечення оптимальної взаємодії між технологіями [15].

Хмарні обчислення забезпечують глобальний доступ до даних ІоМТ, але це створює ризики для конфіденційності, адже дані можуть бути перехоплені або зламані під час передачі через інтернет. Локальна обробка даних у периферійних системах зменшує передачу чутливих даних через мережу, що суттєво знижує ризик витоку інформації. Крім того, обробка поблизу джерела даних відповідає регуляторним вимогам (наприклад, GDPR у ЄС), зменшуючи ризики порушення законодавства. Периферійні обчислення дозволяють проводити аналіз і обробку даних біля джерела, що скорочує час відповіді системи. Це критично важливо для реального часу, наприклад, у хірургічних операціях або інтенсивній терапії. Граничні обчислення зменшують обсяг даних, які потрібно передавати в хмару, і скорочують мережевий трафік, що підвищує продуктивність системи.

Технологія 5G із підтримкою наднадійного зв'язку з низькою затримкою (uRLLC) забезпечує швидку передачу даних, необхідну для критичних медичних застосувань. Мережі 5G дозволяють передавати великі обсяги даних, зокрема відео в реальному часі з медичних пристроїв, таких як носимі монітори чи апаратура для телемедицини. Завдяки можливостям 5G до мережі можуть бути підключені тисячі ІоМТ-пристроїв одночасно, забезпечуючи їхню взаємодію та обмін даними. Периферійні обчислення спрощують і прискорюють діагностику, використовуючи автоматизовані моделі ШІ для аналізу даних пацієнтів. Це знижує навантаження на медичних експертів і скорочує час на постановку діагнозу. ІоМТ із периферійними обчисленнями забезпечує точне прогнозування стану пацієнтів, розробку індивідуальних схем лікування, моніторинг ефективності препаратів і відстеження стану пацієнтів у реальному часі. Інтеграція ІоМТ із 5G та периферійними обчисленнями сприяє обробці великих обсягів даних клінічних досліджень, скорочуючи час розробки ліків. Завдяки периферійним обчисленням зменшується потреба в дорогих хмарних ресурсах та

скорочується залучення людського фактора, що робить медичні послуги доступнішими. ІоМТ із периферійними обчисленнями та 5G розширює можливості телемедицини, дозволяючи отримувати медичні послуги навіть у віддалених регіонах.

Периферійні обчислення у поєднанні з 5G створюють нову екосистему для ІоМТ, яка відповідає сучасним вимогам швидкості, безпеки та доступності. Ці технології не лише забезпечують ефективне управління медичними даними, але й трансформують сектор охорони здоров'я, підвищуючи його адаптивність та інноваційність. Водночас важливим залишається розвиток стандартів безпеки та сумісності для інтеграції цих систем у глобальну медичну інфраструктуру [16].

Архітектура з підтримкою Edge-IoMT (Internet of Medical Things) для інтелектуальної системи охорони здоров'я (Health Intelligence System) має на меті покращити ефективність збору, обробки та аналізу медичних даних. Ця архітектура поєднує Інтернет медичних речей (IoMT) з обчисленнями на "краю" мережі (Edge Computing), що дозволяє зменшити затримки, підвищити безпеку та ефективніше використовувати мережеві ресурси.

Медичні сенсори та пристрої ІоМТ:

- Це носимі пристрої, монітори, інтелектуальні імплантати, медичні гаджети для дому, які збирають медичні дані пацієнта, як-от пульс, артеріальний тиск, рівень глюкози в крові тощо.

- Ці пристрої використовують ІоМТ для обміну даними з локальними обчислювальними пристроями (Edge) або безпосередньо з хмарними сервісами.

Обчислювальні ресурси знаходяться ближче до місця, де збираються дані. Наприклад, це можуть бути локальні шлюзи або пристрої, що здатні обробляти дані безпосередньо на місці. Основні переваги: зменшення затримок, скорочення обсягу переданих даних у хмару, підвищення безпеки та конфіденційності, оскільки менше даних передається через інтернет.

Хоча частина обчислень виконується на "краю", для довгострокового зберігання даних та складніших аналітичних завдань використовуються хмарні

сервіси. У хмарі здійснюються розширений аналіз, машинне навчання, підтримка прийняття рішень і масштабоване зберігання даних.

Між медичними пристроями та хмарою розташовані шлюзи, які виконують роль посередників. Вони здійснюють локальну обробку, фільтрацію, попередню аналітику даних і забезпечують захищений зв'язок між пристроями та хмарою.

Для обробки даних використовуються алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання. Вони можуть працювати як на рівні обчислень на краю, так і в хмарі. Алгоритми використовуються для моніторингу стану здоров'я в реальному часі, прогнозування загострень захворювань, персоналізованих рекомендацій для пацієнтів. Забезпечення захисту конфіденційних медичних даних є критично важливим компонентом. Для цього використовуються різні методи шифрування даних, автентифікація та контроль доступу на всіх рівнях [17].

Переваги такої архітектури:

- Швидкість реагування: Оскільки дані обробляються на "краю", система здатна швидше реагувати на критичні зміни в стані здоров'я пацієнта.

- Низькі затримки: Локальна обробка даних зменшує час, необхідний для передачі даних у хмару і назад.

- Масштабованість: Поєднання обчислень на краю з хмарними сервісами забезпечує високу масштабованість для роботи з великим обсягом медичних даних.

- Безпека та конфіденційність: Локальне зберігання та обробка чутливих медичних даних знижує ризик витоків інформації.

Застосування:

- Дистанційний моніторинг пацієнтів: Пацієнти з хронічними захворюваннями можуть бути постійно під наглядом через IoT-пристрої.

- Розумні лікарні: Інтелектуальні системи можуть допомагати медичному персоналу в діагностиці та прийнятті рішень, оптимізуючи роботу лікарень.

- Телемедицина: Віртуальні консультації з лікарями та моніторинг пацієнтів у віддалених регіонах за допомогою IoT і Edge Computing.

Така архітектура сприяє розвитку персоналізованої медицини, роблячи системи охорони здоров'я більш доступними, ефективними та безпечними.

У сфері «розумної» системи охорони здоров'я було докладено багато зусиль для створення надійної та зручної основи для систем пристроїв на базі IoMT [10]. У біомедичній галузі та завдяки зростанню кількості пристроїв, що носяться, інтелектуальні системи охорони здоров'я поступово змінили традиційну медичну систему [11]. Ці пристрої та датчики в основному використовуються для збору даних про артеріальний тиск, частоту дихання, рухову функцію, рівень глюкози в крові, електрокардіограму (ЕКГ), електроенцефалограму (ЕЕГ) та температуру тіла, серед іншого, для проведення первинних медичних оглядів. Забезпечення ранньої діагностики з використанням цих даних допомагає зберегти систему охорони здоров'я та усунути інші ускладнення під час лікування пацієнтів [18].

IoMT використовується в медичній системі для управління порадами лікарів пацієнтам, медичними інструментами, записами пацієнтів, діагностикою захворювань та лікуванням пацієнтів. Застосування алгоритмів машинного навчання (ML) в системі на основі IoMT робить інтелектуальну систему охорони здоров'я високоефективною в області діагностики, прогнозування захворювань, системи моніторингу здоров'я та перед використанням людиною [12]. Системи на основі IoMT дозволяють телемедицину, таку як телехірургія, телереабілітація та телемедицина, які здійснюють дистанційний моніторинг, лікування та діагностику пацієнтів у режимі реального часу. Вони використовують модель на основі IoMT для передачі медичних даних до бази даних за допомогою хмарних моделей на основі IoMT. Моделі складаються з трьох основних компонентів, а саме: мережі датчиків тіла (BSN), шлюзів і хмарного серверного центру. В останні роки система на основі IoMT підтримує медичні послуги в режимі реального часу для віддалених зацікавлених сторін. Дані, зібрані за допомогою пристроїв на основі IoMT, надаються лікарям і відповідним зацікавленим сторонам для перевірки і надання корисної інформації пацієнтам, коли це необхідно.

Система на основі IoMT з периферійними обчисленнями зменшує затримки в наданні послуг, є енергоефективною та економічно вигідною, а також забезпечує максимальне задоволення для учасників системи охорони здоров'я. Більшість середовищ на основі IoMT залежать від хмарної платформи для масових інтелектуальних систем охорони здоров'я [13].

Модель може бути використана для пересилання зібраних даних, отриманих з пристроїв IoMT, через Інтернет до хмари, і, таким чином, використовуватися для діагностики з метою надання корисних звітів за допомогою алгоритмів навчання, таких як ML або глибоке навчання (DL). Але система IoMT-Cloud не підходить, особливо там, де необхідна менша затримка. Таким чином, системи на основі IoMT потребують більш швидкої та малозатратної технології захисту з чутливим до затримок, розумним, безпечним, стабільним інтелектуальним управлінням охороною здоров'я. Граничні обчислення є відповіддю на це питання, оскільки вони є тривалим типом хмарних обчислень, де дані на основі IoMT можуть обчислюватися ближче до краю мережі, де вони виробляються [14].

Граничні обчислення зменшують затримку, трафік даних і відстань до мережі, оскільки вони виконуються на локальному рівні обробки, закритому від хмарної бази даних. Граничні обчислення стали актуальними і важливими, оскільки пристрої можуть розпізнавати дані інтуїтивно, а отже, стають корисними в системах на основі IoMT, щоб зменшити затримку до нижчого рівня. На рис. 1.1 зображено архітектуру периферійних обчислень, де перша частина мережі використовує пристрої та датчики на основі IoMT для збору даних, які будуть оброблятися через шлюз за допомогою мережі радіодоступу, що використовує периферійні пристрої для локальної обробки даних, агрегованих мережею. Після обробки даних всі обчислювальні операції та зберігання даних у пам'яті переносяться у хмару.

Граничний рівень є точкою з'єднання, де доступні достатні мережеві, обчислювальні та сховищні ресурси для управління локальним збором даних, які можна легко отримати і швидко отримати результати. У більшості ситуацій

використовуються малопотужні системи на кристалі (SoC), оскільки вони призначені для збереження компромісу між продуктивністю обробки даних і енергоспоживанням. Хмарні сервери, з іншого боку, мають потужність для проведення розширеної аналітики та завдань машинного навчання для об'єднання часових рядів, сформованих різноманітними гетерогенними або змішаними типами об'єктів [15].

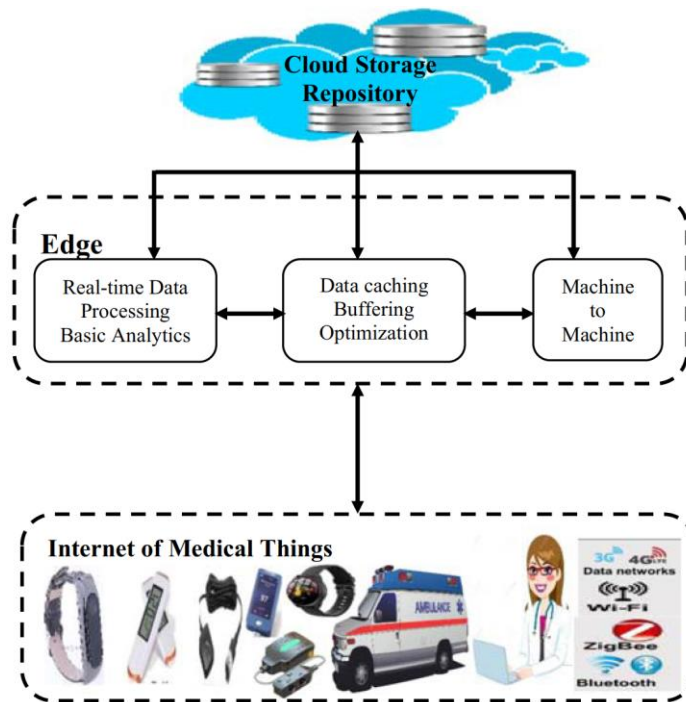


Рисунок 1.1 – Структура архітектури периферійних обчислень в системі на основі ІоМТ.

Система на основі Інтернету речей використовується для генерування великих обсягів медичних даних завдяки впровадженню бездротових технологій та індивідуальних покращених послуг. Такі великі медичні дані генеруються з незліченних джерел, а хмарний сервер використовується для зберігання, аналізу та обробки таких даних, як текст, мультимедіа, та зображення [16]. Висока затримка, проблеми з безпекою та мережевим трафіком виникають в результаті обробки великих хмарних медичних даних. Туманні обчислення були впроваджені для мінімізації навантаження на хмару як нову обчислювальну

платформу. Туман також допомагає наблизити хмарний сервіс до межі мережі і, таким чином, забезпечує більш досконалі та безпечні медичні послуги.

Границя мережі є ідеальним місцем для аналізу медичної інформації в режимі реального часу, де створюються дані. Функції периферійних обчислень випереджають хмарні обчислення, такі як попередня обробка даних, локальна аналітика даних, безпека і конфіденційність даних, тимчасове зберігання, обрізка даних, розподілене, децентралізоване зберігання. Як розподілені периферійні, так і централізовані хмарні сервери необхідні в додатках на основі ІоМТ, таких як системи моніторингу здоров'я, для ефективного виконання аналізу великих даних.

Використання периферійних обчислень в якості посередника створило кращий спосіб роботи з хмарними базами даних на пристроях на основі ІоМТ для систем охорони здоров'я в режимі реального часу [17]. Граничні обчислення виводять ресурси на периферію мережі як розширення хмарних обчислень. Це ефективно наближає переваги і потужність хмари до місця, де виробляються дані, тим самим допомагаючи і прискорюючи «рішення на льоту» для додатків в інтелектуальній системі охорони здоров'я. Основна мета цієї децентралізованої моделі полягає в тому, щоб наблизити пристрої та програмне забезпечення до межі мережі, де генеруються дані. Основна мета периферійних обчислень - зменшити обсяг даних, які передаються в хмарні центри обробки даних для обробки та аналізу. Це також покращує безпеку, що є ключовим питанням в індустрії ІоМТ [18, 19].

1.2 Фреймворк для інтелектуальної системи охорони здоров'я на основі edge-ІоМТ

Технологія хмарних обчислень після розрахунку повертає результати на термінальне обладнання, використовуючи дані збору з системи на базі ІоМТ, завантажуючи медіальні інструменти терміналу даних у віддалену хмару. Але

тиск на хмару стає вищим, якщо згенеровані дані величезні, що призводить до затримок і споживання енергії через величезне навантаження даних у хмарі. В таких умовах хмарні обчислення самі по собі не можуть допомогти забезпечити реакцію в реальному часі та зменшити затримку. Основною метою медичної хмари на основі IoMT є ефективне розширення можливостей хмарних обчислень, що надаються на межі мережі з використанням розподілених обчислювальних ресурсів [20]; таким чином, периферійні обчислення є ідеальним додатком для задоволення цього обчислювального попиту [21, 22]. На рис. 1.2 показана загальна структура запропонованої системи на основі Edge-IoMT.

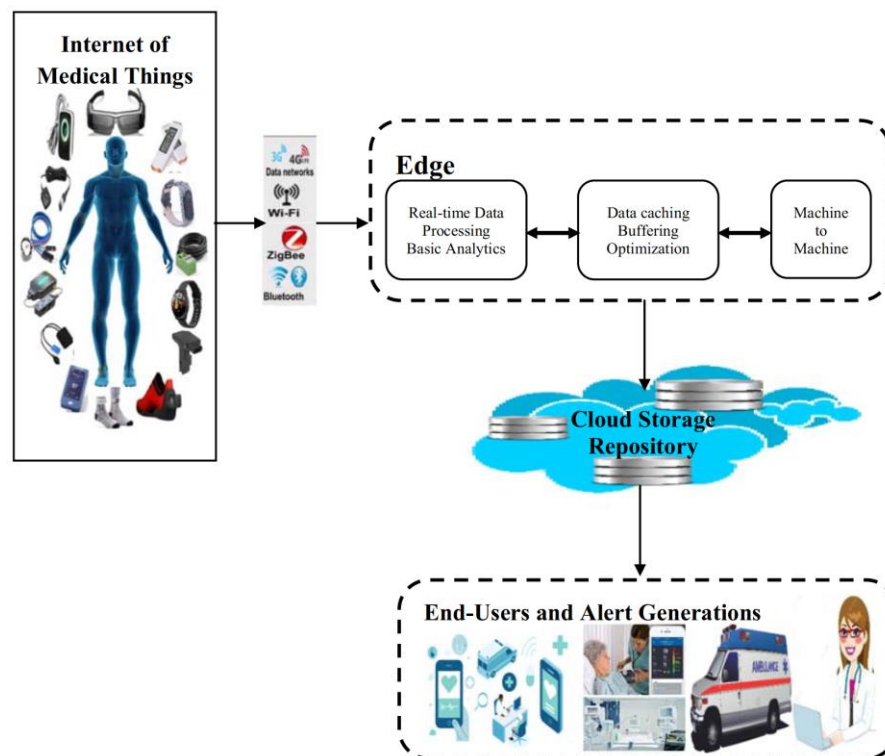


Рисунок 1.2 – Запропонована архітектура для інтелектуальної системи охорони здоров'я на основі edge-IoMT

Структура містить чотири шари та ключові технології. Ці чотири шари - це пристрої на основі IoMT, периферійні обчислення, хмарні обчислення та рівні кінцевих користувачів/генерації сповіщень. Рівень пристроїв на основі IoMT використовується для збору та фіксації даних від пацієнтів і передачі їх до

периферійних обчислень через шлюз, зібрані дані будуть оброблятися з периферії і надсилати результат до бази даних хмарних обчислень для подальшого використання. Останній рівень призначений для кінцевого користувача, який використовує згенеровані результати і генерує сповіщення, які можуть бути надіслані користувачеві (пацієнту).

Рівень на основі ІоМТ складається з різних технологій, пов'язаних з медициною, таких як носимі пристрої та медичні датчики. Спочатку, під час передачі даних про стан здоров'я, пристрої ІоМТ використовуються для збору інформації про здоров'я пацієнта, а пов'язані між собою пристрої взаємодіють з іншим обладнанням. Пристрої на основі ІоМТ збирають медичну інформацію, таку як ЕКГ, температура тіла, частота серцевих скорочень, пульсоксиметрія, рівень холестерину і серцебиття, поки вони знаходяться в організмі. Для оцінки проблем зі здоров'ям пацієнта ця інформація надсилається на периферійні обчислення.

Різні вузли периферійної мережі можуть використовуватися як інтелектуальні термінальні пристрої в таких пристроях, як ноутбуки, смартфони та інші, або мати шлюзи мережевих пристроїв, таких як маршрутизатори та Wi-Fi. Вузли розподілені в хмарній базі даних і термінальному обладнанні в пристроях на основі ІоМТ. Граничні обчислення забезпечують більш гнучку та чутливу мережу завдяки обмеженим переходам між різними вузлами та термінальним обладнанням, що використовується в системній платформі на основі ІоМТ, з мережевими ресурсами та хмарним сховищем. Це дозволить запобігти та зменшити затримку запитів та інші проблеми безпеки, які є важливими в інтелектуальних системах охорони здоров'я.

1.3 Перспективи периферійних обчислень для інтернету медичних речей

Гранична технологія «Mobile Edge Computing (MEC)», створена Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів (ETSI), використовувала 4G, 5G і мережі радіодоступу (RAN) як основну цільову

аудиторію [23, 24]. МЕС пропонує периферійні обчислення в інтелектуальній системі охорони здоров'я на базових станціях обчислювальних ресурсів і рекомендує розміщення сховищ даних. Ініційовані Microsoft, мікро-центри обробки даних (MDC) розширюють хмарні центри обробки даних за рахунок малогабаритних версій центрів обробки даних (Avelar, 2015), отже, розширюють хмарні сервіси, наближаючи їх до кінцевих користувачів. Визначення cloudlet дуже близьке до визначення MDC Університету Карнегі-Меллона (CMU), де віртуалізований центр обробки даних був дуже малим і розподілено обслуговував користувачів на периферії [25-27]. Ці терміни також пов'язані з іншими подібними об'єктами і поняттями, такими як нано-центри обробки даних [28].

Граничні технології можуть працювати разом і співпрацювати, навіть якщо різні граничні технології визначаються незалежно один від одного [29]. Беручи до уваги футуристичні аспекти структури, заснованої на IoMT, і недавні розробки в області взаємодії технологій, такі як гетерогенні мережі (HetNets) і взаємопов'язані мережі доставки контенту (CDN). IoE можуть бути ефективнішими і результативнішими, якщо використовувати різні передові технології, що працюють разом. За оцінками IDC, 45% даних, отриманих за допомогою IoT, будуть оброблятися, зберігатися і аналізуватися на периферії до 2019 року [30].

Граничні обчислення все ще перебувають на стадії зародження, не маючи стандартизованих концепцій, дизайну та властивостей. Різні дослідники характеризують периферійні технології з різних точок зору, які вимагають від них незмінних навичок. Відсутність спільного опису взаємозв'язку між периферійними технологіями, Інтернетом речей та хмарою сприяє виникненню хибних уявлень. У літературі, де автори стверджують, що технології периферійних обчислень можуть «витіснити» або «замінити» хмару туманом або децентралізувати хмарну парадигму на периферію, наводяться приклади таких помилкових уявлень.

Хмарних обчислень недостатньо для обробки та зберігання великих обсягів даних, що генеруються на основі Інтернету речей, тому для обробки даних необхідно перемістити їх на периферію мережі [31]. Інновації, привнесені периферійними обчисленнями, слід розглядати як заміну хмарної моделі, оскільки вони були створені лише як додаткові агенти для хмарних сервісів і повинні допомогти в розширенні хмарних сервісів для додатків в режимі реального часу [1]. В аналітиці великих даних хмара необхідна для виконання ресурсоємних пакетних завдань і тривалої обробки даних збору за допомогою пристроїв на основі Інтернету речей. Аналогічно, різні автори розглядають периферійні обчислення як центри мікроданих, а розуміння і сприйняття периферійних технологій часто плутають [2], тоді як інші зосереджуються саме на концепції вдосконалення та оснащення додаткових потужностей обробки та зберігання даних для мережевих компонентів [3].

Використання периферійних обчислень в обробці величезних обсягів даних, які генеруються пристроями Інтернету речей, забезпечить стратегії аналізу великих даних на межі мережі для забезпечення обробки даних в режимі реального часу. Граничні обчислення забезпечили гнучку обробку великих даних на вимогу локально, не обов'язково відправляючи зібрані дані в хмару, таким чином усунувши проблеми підвищеної затримки і споживання пропускнуої здатності. Збір, агрегацію та попередню обробку великих даних можна здійснювати за допомогою поєднання периферійних і хмарних обчислень, мінімізуючи транспортування даних і хмарне зберігання. Наприклад, на периферійному рівні можна збирати і обробляти локальні дані для системи спостереження за навколишнім середовищем, щоб забезпечити своєчасне введення даних в надзвичайних ситуаціях.

Оскільки мультимедіа вимагає більшої пропускнуої здатності, обробки і пам'яті, управління такими величезними обсягами з точки зору прийняття рішень, обробки і зберігання є складним завданням [4]. Граничні обчислення покликані допомогти зменшити загальну вартість наскрізного використання, доставки, ефективного функціонування та обробки мультимедійних ресурсів у

таких ситуаціях [5-7]. Високі витрати також пов'язані з розповсюдженням мультимедіа. CDN, такі як CloudFront, стягують високі ціни, коли йдеться про надання даних у Тбіт/с. Повідомлялося, що YouTube Live і Twitch досягали 1 Тбіт/с у пікові години в 2014 році [8]. Дослідження, проведене з використанням трасового аналізу Twitch, показало, що обсяг відеоконтенту в 1,5 Тбіт/с перевищив показник у 1,5 Тбіт/с для глядачів по всьому світу [9]. Необхідно також враховувати, що будь-яке слово покращує доступність Інтернету та швидкість передачі даних, що означає вищий доступ споживачів до даних.

Крім того, поєднання хмарних і периферійних обчислень при побудові надійної системи на основі ІоМТ допоможе в просуванні потужної і швидкої системи обробки даних в інтелектуальній системі охорони здоров'я. Крім того, надшвидка реакція та наднадійність потребують алгоритмів, які працюють у пристрої, щоб гарантувати роботу сенсорних додатків. Гранична система забезпечила сприятливу платформу для виконання різних завдань, пов'язаних з тактильними інтернет-додатками в периферійних або хмарних шарах. Існує потреба в нових алгоритмах планування завдань через мережевий трафік, який може виникати на обчислювальних вузлах з іншими змінними, де виконуються завдання, і затримка іноді набагато перевищує поріг в 1 см. Це необхідно для того, щоб забезпечити виконання робіт в межах кумулятивного порогу і не перевищити 1 мс.

Для оптимального планування завдань потрібні нові алгоритми ML і штучного інтелекту. Для прогнозування поведінки та реакцій вони можуть працювати виключно в периферійному шарі або навіть розподілено через хмару та/або периферійні шари. Граничні обчислення допомагають зменшити загальне навантаження на мережу під час мережевого з'єднання в платформі на основі ІоМТ, і це допоможе задовольнити вимогу затримки в 1 мс. Різні складні алгоритми, такі як методи на основі нейронних мереж і прості регресійні моделі, можуть бути розглянуті при моделюванні системи [10, 11].

1.4 Висновки до розділу 1

Поява хмарних обчислень значно змінила багато сфер людської діяльності, особливо охорону здоров'я, де вони стали основою для розумних систем. Завдяки хмарним технологіям, системи на основі Інтернету речей (IoT) отримали такі переваги, як висока швидкість обробки даних, гнучкість, масштабованість і доступ до обчислювальних ресурсів. Однак із зростанням кількості пристроїв ІоМТ (Інтернет медичних речей) виникли нові виклики, які обмежують можливості традиційних хмарних моделей, включаючи проблеми з масштабованістю, затримками та навантаженням на мережу.

Периферійні обчислення (edge computing) пропонують вирішення цих проблем. Вони забезпечують низькі затримки, високу продуктивність в реальному часі, підвищену безпеку та конфіденційність. Завдяки тому, що обчислювальні ресурси та сховища даних розташовані ближче до кінцевих користувачів, периферійні обчислення зменшують залежність від хмари, знижуючи навантаження на магістральну мережу та затримки. Гетерогенна і розподілена структура периферійних обчислень дозволяє ефективно обслуговувати системи ІоМТ, надаючи гнучкі, масштабовані послуги з обробки даних і зв'язку.

Застосування периферійних обчислень в інтелектуальних системах охорони здоров'я демонструє суттєві переваги, зокрема:

1. Підвищена швидкість відгуку в режимі реального часу (мілісекундний і субсекундний рівні).
2. Зменшення ризиків, пов'язаних із централізованим зберіганням медичних даних у хмарі.
3. Використання віртуалізованих центрів даних і мереж периферійних пристроїв.
4. Гнучкість і надійність у випадках збоїв.
5. Ефективна робота в багатокористувацькому середовищі.

Периферійні обчислення стають критично важливими в сучасній системі охорони здоров'я, особливо для реалізації додатків з низькою затримкою та моніторингу пацієнтів у реальному часі. У перспективі ці технології сприятимуть розвитку систем швидкої діагностики та безперервного контролю здоров'я, забезпечуючи новий рівень ефективності та зручності у сфері медицини.

2 АРХІТЕКТУРА АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРИСТРОЇВ ПЕРИФЕРІЙНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

2.1 Базові концепції хмарної, туманної та периферійної обчислювальної інфраструктури

Периферійні обчислення (edge computing) стали ключовою складовою сучасної інфраструктури обробки даних, особливо в умовах розгортання мереж 5G. Їх головна перевага — зменшення затримки за рахунок наближення обчислювальних потужностей до джерел даних. Ця особливість робить периферійні обчислення каталізатором для широкого впровадження 5G, забезпечуючи мережі наднизькою затримкою, що критично важливо для таких додатків, як [12]:

1. Високоякісні відеоконференції забезпечують стабільний зв'язок без затримок.
2. Онлайн-ігри мінімізують затримки, що є вирішальним фактором для комфортної гри.
3. Віртуальна та доповнена реальність потребують миттєвої обробки даних для реалістичності.
4. Інтернет речей (IoT) сприяють швидкому аналізу даних для «розумних» систем.
5. Аналіз великих даних покращують ефективність обробки інформації в реальному часі.
6. Криптовалютна торгівля знижують затримки для більш швидких операцій.

Хоча хмарні, туманні та периферійні обчислення можуть здаватися схожими, вони мають суттєві відмінності:

- Хмарні обчислення зберігаються і обробляються на віддалених серверах, до яких користувачі отримують доступ через Інтернет. Це зручно для задач, які не потребують миттєвого відгуку, але може створювати затримки.

- Туманні обчислення (fog computing) забезпечують проміжний рівень між хмарою і периферією, дозволяючи здійснювати обробку даних ближче до джерела, але не безпосередньо на кінцевих пристроях.

- Периферійні обчислення орієнтовані на обробку даних максимально близько до джерела, що забезпечує наднизькі затримки та ефективну роботу в реальному часі. Системи на основі IoT, такі як «розумна» охорона здоров'я, сільське господарство, транспортні системи та міста, генерують величезні обсяги даних, які потребують швидкої обробки та доступності. Поєднання машинного навчання та периферійних обчислень дозволяє таким системам працювати більш ефективно, знижуючи витрати на передачу даних до хмари та затримки, а також підвищуючи рівень безпеки та конфіденційності.

Загалом, периферійні обчислення відкривають нові можливості для обробки даних у реальному часі, забезпечуючи оптимізацію ресурсів для сучасних високотехнологічних додатків.

Обробка даних у хмарних сервісах, хоча і залишається популярною, часто є дорогим і ресурсомістким рішенням для IoT-додатків, особливо в режимі реального часу. Це стимулює компанії до впровадження туманних і периферійних обчислень як альтернативи або доповнення до хмарної інфраструктури. Основні характеристики та переваги цих обчислювальних моделей включають [13]:

- Туманні обчислення забезпечують проміжний рівень між пристроями IoT і хмарою, дозволяючи обробку даних у локальній мережі (LAN) на туманних вузлах або IoT-шлюзах.

- Периферійні обчислення виконують обробку даних безпосередньо на пристроях або датчиках, знижуючи мережевий трафік і забезпечуючи швидке реагування.

- Туманні вузли допомагають зменшити витрати, пов'язані з прямою передачею даних у хмару, оптимізуючи обробку інформації.

- Периферійні пристрої зберігають конфіденційну інформацію локально, мінімізуючи ризики витоку даних через мережу.

- Використання пристроїв із низьким енергоспоживанням (ULP) забезпечує ефективність периферійної інфраструктури.

- Впровадження штучного інтелекту безпосередньо в периферійні пристрої (наприклад, EPIC, PAC, PLC) дає змогу аналізувати дані та автоматизувати процеси в реальному часі.

Периферійні обчислення підтримують вимоги до високої швидкості обробки даних і низької затримки, що робить їх критично важливими для мереж 5G та сучасних IoT-застосунків. Це включає:

- Віртуальна і доповнена реальність, онлайн-ігри, аналітика великих даних та криптовалютна торгівля виграють від низьких затримок і швидкого доступу до обчислювальних потужностей.

- Периферійні обчислення значно полегшують розгортання мереж 5G, забезпечуючи стабільність і надійність з'єднання.

- Локальна обробка даних зменшує навантаження на центральні сервери та магістральні мережі.

Хмарні обчислення централізовані, і хоча вони ідеальні для великих обсягів даних і аналітики, їх обмеження включають затримки та високу вартість для застосувань реального часу. Туманні обчислення діють як посередник, обробляючи дані на проміжному рівні, тоді як периферійні обчислення безпосередньо оптимізують роботу пристроїв IoT. Загальна структура промислового IoT складається з хмарних, туманних і периферійних обчислень, як показано на рис. 2.1. Подальший розвиток периферійних обчислень має зосереджуватись на:

- Підвищенні ефективності інфраструктури через простоту розгортання та підтримку пристроїв із низьким енергоспоживанням.

- Інтеграції з мережами 5G для розширення спектру послуг у таких галузях, як медицина, промисловість, транспорт і «розумні» міста.

Таким чином, периферійні та туманні обчислення доповнюють хмарні технології, забезпечуючи гнучкість, безпеку та швидкодію в епоху цифрових інновацій [14].

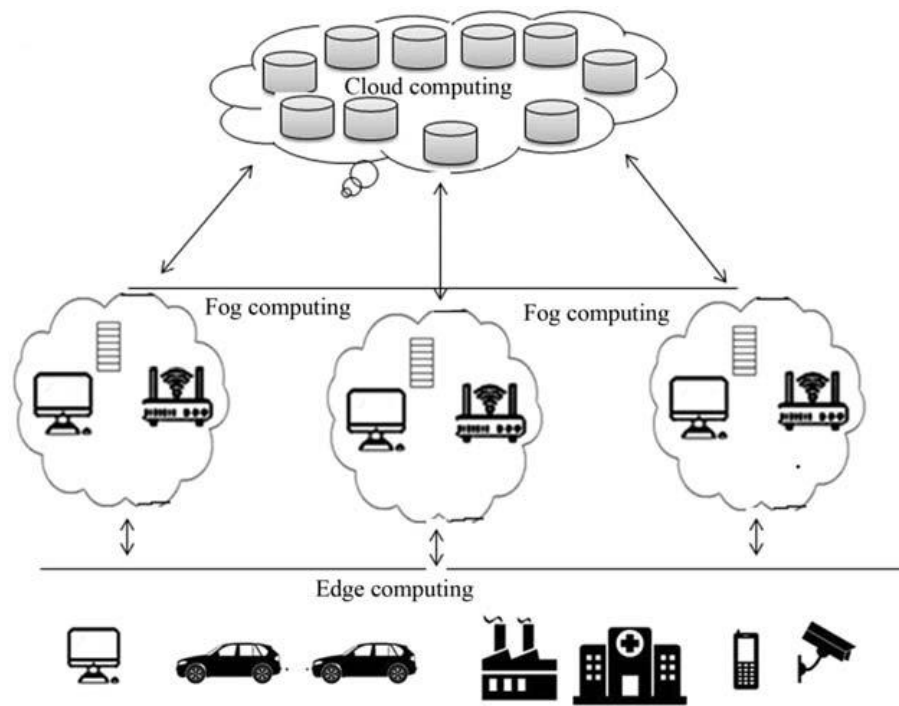


Рисунок 2.1 – Архітектура промислового Інтернету речей з хмарними, туманними та периферійними обчисленнями

Хмарні обчислення (Cloud Computing).

Місце обробки: Віддалені центри обробки даних.

Особливості: Централізована обробка даних із доступом через Інтернет.

Переваги: Масштабованість, висока обчислювальна потужність.

Недоліки: Затримка через передачу даних до віддаленого центру, обмежена підтримка роботи в реальному часі.

Периферійні обчислення (Edge Computing).

Місце обробки: Безпосередньо біля пристроїв, ближче до користувача або кінцевого пристрою.

Особливості: Дані обробляються на локальних пристроях або серверах ближче до кінцевого користувача.

Переваги: Зменшення затримки, підтримка додатків в реальному часі, зменшення обсягу даних, що надсилаються в хмару.

Недоліки: Обмежені ресурси для обробки у порівнянні з хмарними сервісами.

Туманні обчислення (Fog Computing).

Місце обробки: Локальна мережа (LAN) між хмарою та кінцевим пристроєм.

Особливості: Інфраструктура, яка "розширює" хмару ближче до кінцевих пристроїв за допомогою шлюзів і вузлів.

Переваги: Обробка даних ближче до пристроїв IoT, що забезпечує підтримку інтелектуальних систем і пристроїв IoT. Недоліки: Складність в управлінні, необхідність інтеграції пристроїв з інтелектом та зв'язком.

Периферійні обчислення з мультидоступом (MEC – Multi-access Edge Computing).

Місце обробки: В межах мережі радіодоступу (RAN) мобільних мереж.

Особливості: Розширює функціональність периферійних обчислень для мобільних мереж (наприклад, у 5G).

Переваги: Зниження затримки, підтримка AR/VR, Інтернету речей (IoT), визначення місцезнаходження в реальному часі, підвищення продуктивності мереж. Недоліки: Вимагає інтеграції з інфраструктурою RAN та підтримки мереж 5G [15]. Основні відмінності між туманними, хмарними та периферійними обчисленнями вказані в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Критерії туманних, хмарних та периферійних обчислень

Критерій	Хмарні обчислення	Туманні обчислення	Периферійні обчислення
Місце обробки	Централізовані центри обробки даних	Локальна мережа (LAN)	Локальні пристрої та вузли
Затримка	Висока	Середня	Низька
Обсяги передачі	Великі	Середні	Низькі
Інтеграція з IoT	Низька	Висока	Середня
Реальний час	Обмежена	Так	Так
Складність	Низька	Висока	Середня

Периферійні обчислення (Edge), туманні обчислення (Fog), МЕС та хмарні обчислення (Cloud) є ключовими технологіями для забезпечення ефективності та швидкодії майбутніх мереж, включно з 5G і IoT. Туманні обчислення забезпечують обробку даних в інфраструктурі локальної мережі для IoT, зменшуючи залежність від хмари. МЕС (Mobile Edge Computing) особливо актуальні для мобільних додатків 5G, включно з AR/VR та автоматизованим транспортом, оскільки зменшують затримки і підвищують якість роботи в реальному часі [16]. Граничний IoT показаний на рис. 2.2.

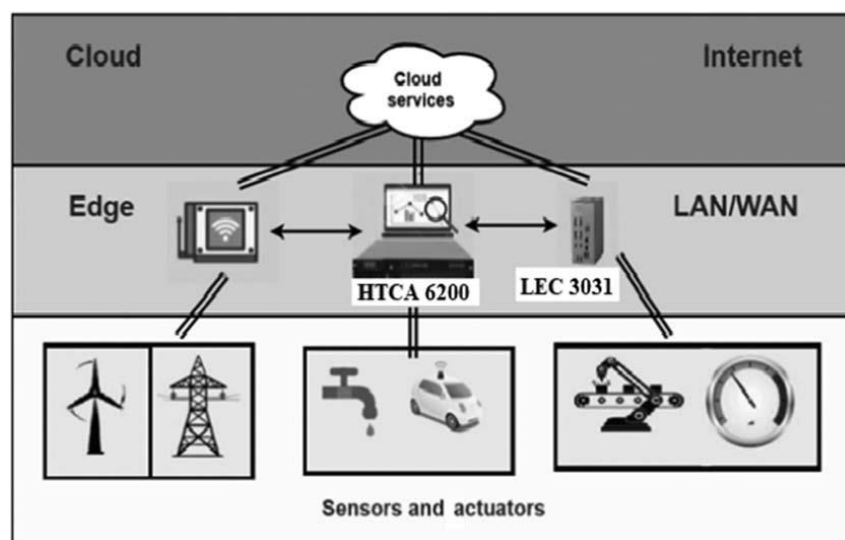


Рисунок 2.2 – Архітектура Інтернету речей на основі периферії

Туманні обчислення (Fog Computing) — це концепція, що забезпечує децентралізовану інфраструктуру обробки даних, яка розширює хмарні обчислення на периферію мережі. Така архітектура зменшує затримки і покращує ефективність роботи мобільних додатків та систем зберігання даних.

Основні аспекти туманних обчислень:

1. Туманні вузли розміщуються між хмарними центрами обробки даних і джерелами даних (наприклад, датчиками або пристроями IoT). Вони зменшують обсяги даних, які передаються у хмару, обробляючи їх локально.

2. Туманні вузли здатні аналізувати дані в реальному часі, забезпечуючи більш швидкий відгук для критично важливих додатків, ніж традиційні хмарні обчислення.

3. Клаудлети це невеликі центри обробки даних, розташовані ближче до кінцевих користувачів (наприклад, у межах локальної мережі). Вони підтримують виконання завдань на віртуальних машинах, зменшуючи затримки та підвищуючи ефективність мобільних обчислень.

4. Завдяки інтеграції мобільних і хмарних обчислень, туманні обчислення дозволяють мобільним користувачам запускати додатки, які фізично розташовані ближче до них, що мінімізує час затримки.

5. Переваги:

- Локальна обробка даних дозволяє уникнути високих затримок, пов'язаних із передачею інформації в хмару через глобальну мережу (WAN).
- Локальна обробка знижує навантаження на хмарні центри.
- Завдяки туманним обчисленням IoT-пристрої отримують змогу обробляти великі обсяги даних ближче до джерела.

Виклики:

- Через децентралізований характер архітектури важливо забезпечити надійний захист даних.
- Забезпечення безперебійної роботи між хмарними, туманними та периферійними пристроями потребує складної координації [17]. Таким чином, туманні обчислення дозволяють забезпечити ефективну обробку даних у системах із високими вимогами до швидкості та доступності, що є важливим для сучасних мобільних і IoT-додатків.

2.2 Роль периферійних обчислень в Інтернеті речей

Периферійні обчислення (Edge Computing) — це концепція, яка передбачає обробку даних ближче до джерела їх створення (наприклад, IoT-пристроїв) замість відправки в централізовану хмару. Цей підхід дозволяє зменшити

затримки, знизити навантаження на мережу та підвищити швидкість прийняття рішень у реальному часі.

Основні характеристики периферійних обчислень.

1. На відміну від хмарних обчислень, де обробка виконується у великих дата-центрах, у периферійних обчисленнях вона відбувається ближче до джерел даних (на пристроях IoT або периферійних вузлах).

2. Периферійні пристрої можуть функціонувати навіть за відсутності зв'язку з центральним хмарним сервером.

3. Завдяки локальній обробці даних затримки зменшуються, що є критично важливим для додатків реального часу (наприклад, автономні автомобілі, телемедицина тощо).

4. Оскільки більшість обчислень виконується локально, обсяг переданих у хмару даних значно зменшується, що знижує навантаження на мережу та підвищує її пропускну здатність.

5. Периферійні обчислення доповнюють та інтегруються з іншими технологіями, такими як IoT, туманні обчислення, хмарні обчислення та грид-обчислення.

Архітектура периферійних обчислень включає три основні рівні:

1. Пристрої IoT (датчики, розумні пристрої, контролери) — збирають і відправляють дані до периферійних вузлів.

2. Периферійні вузли (Edge Nodes) — обробляють дані на місці. Це можуть бути мікроконтролери, маршрутизатори або сервери периферійної обробки.

3. Хмара — використовується для більш глибокої аналітики та довгострокового зберігання даних, але лише тієї частини даних, яка є необхідною.

Переваги периферійних обчислень.

- Низькі затримки — критично важливо для автономного транспорту, промислової автоматизації та додатків з елементами віртуальної/доповненої реальності (VR/AR).

- Підвищена безпека та конфіденційність — локальна обробка даних знижує ризик перехоплення або втрати даних у процесі їх передавання в хмару.

- Менші витрати на передачу даних — обробка значної частини інформації локально знижує обсяг даних, які потрібно передавати у віддалені дата-центри. Відмінності між туманними та периферійними обчисленнями вказані в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Критеріальний аналіз туманних та периферійних обчислень

Критерій	Туманні обчислення (Fog Computing)	Периферійні обчислення (Edge Computing)
Розташування обробки	Ближче до хмари (проміжний рівень)	На пристроях або вузлах, найближчих до джерела даних
Обладнання	Сервери туману (Fog Nodes)	Пристрої IoT, контролери, маршрутизатори
Затримка	Низька, але трохи вища, ніж у периферійних обчисленнях	Надзвичайно низька (локальна обробка)
Обсяг переданих даних	Середній — частина даних передається у хмару	Мінімальний — більшість обробляється локально
Приклади застосування	Системи "розумного міста", інтелектуальні мережі	Автономні автомобілі, робототехніка, VR/AR

Застосування периферійних обчислень.

- Автономні транспортні засоби — обробка зображень та даних сенсорів відбувається в реальному часі.

- Розумні фабрики (Industry 4.0) — периферійні вузли на виробничих лініях можуть швидко виявляти несправності обладнання та ухвалювати рішення без звернення до хмари.

- Охорона здоров'я — для моніторингу життєвих показників пацієнтів у реальному часі, особливо у віддалених регіонах, де немає стабільного інтернет-з'єднання.

- Віртуальна та доповнена реальність (VR/AR) — для забезпечення мінімальної затримки при взаємодії з віртуальним контентом.

- Безпілотники та роботи — автономне прийняття рішень на основі обробки даних із сенсорів у режимі реального часу. Периферійні обчислення — це ключова технологія для додатків, які потребують мінімальної затримки, високої швидкості обробки та роботи в режимі реального часу. Вони забезпечують локальну обробку даних на пристроях IoT або периферійних вузлах, знижуючи навантаження на мережу та підвищуючи швидкість прийняття рішень. Разом із туманними та хмарними обчисленнями вони формують цілісну екосистему для підтримки сучасних додатків Інтернету речей, автономного транспорту та розумних міст [18]. Архітектура розширюваного периферійного сервера показана на рис. 2.3, з якого видно, що периферійні обчислення включають в себе кілька технологій, таких як IoT, хмарні обчислення і грід-обчислення.

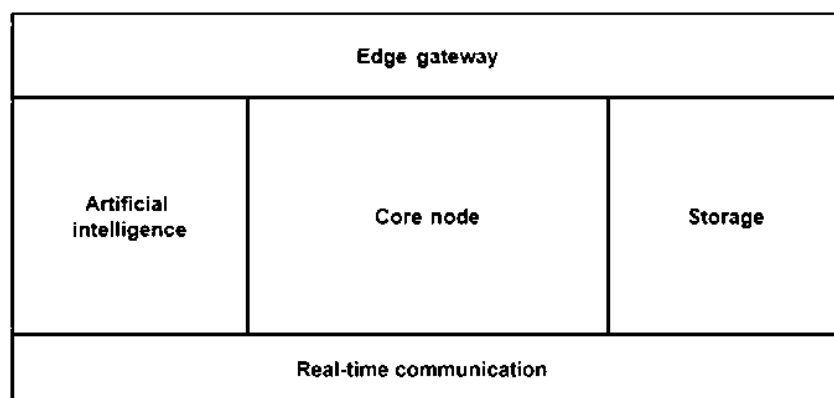


Рисунок 2.3 – Розширювана архітектура периферійних серверів

Периферійні обчислення в контексті Інтернету речей (IoT) спрямовані на досягнення ряду цілей, серед яких мінімізація затримок, управління мережею, оптимізація витрат, управління енергоспоживанням, управління ресурсами, а також управління даними і типами даних. Наведемо ключові аспекти кожної з цих цілей:

1. Мінімізація затримок особливо важливо для додатків, чутливих до затримок, таких як інтелектуальний транспорт, безпілотні транспортні засоби та системи запобігання дорожньо-транспортним пригодам. Мінімізація затримок може значно підвищити якість послуг у цих сферах.

2. Ефективне управління мережею допомагає забезпечити стабільну і надійну роботу периферійних обчислень, що є критично важливим для підтримання з'єднання між пристроями і серверами.

3. Економічні закони застосовуються для мінімізації витрат на обробку і передачу даних, що є важливим для забезпечення рентабельності периферійних обчислень.

4. Врахування енергоефективності допомагає знизити енергоспоживання пристроїв IoT, що є важливим для збільшення їх тривалості роботи без підзарядки і зменшення загальних експлуатаційних витрат.

5. Ефективне використання обчислювальних і мережевих ресурсів дозволяє забезпечити стабільну роботу периферійних обчислень при високих навантаженнях.

6. Правильне управління даними забезпечує їхню безпеку, конфіденційність і доступність. Закон землі (як зазначено у джерелі) застосовується там, де дані потребують високої безпеки і повинні оброблятися локально.

Периферійні обчислення також повинні мати такі характеристики, як мобільність, сумісність, надійність, низька затримка і можливість взаємодії в реальному часі. Це забезпечує ефективний збір даних, аналіз, прийняття рішень і вивідний контроль [19].

Для забезпечення ефективної роботи периферійних систем IoT використовуються різні технології і стандарти:

- Периферійні системи повинні підтримувати мобільність пристроїв, що дозволяє їм зберігати з'єднання і функціональність під час руху.
- Периферійні пристрої повинні бути сумісними з різними протоколами і платформами IoT.
- Системи повинні бути стійкими до збоїв і забезпечувати безперервну роботу.
- Висока швидкість обробки і передавання даних є критично важливою для додатків, що вимагають взаємодії в реальному часі.
- Програмне забезпечення для периферійних обчислень повинно бути модифіковане для забезпечення обробки в реальному часі. Роль граничних серверів для різних доменів представлена на рис. 2.4 [20].

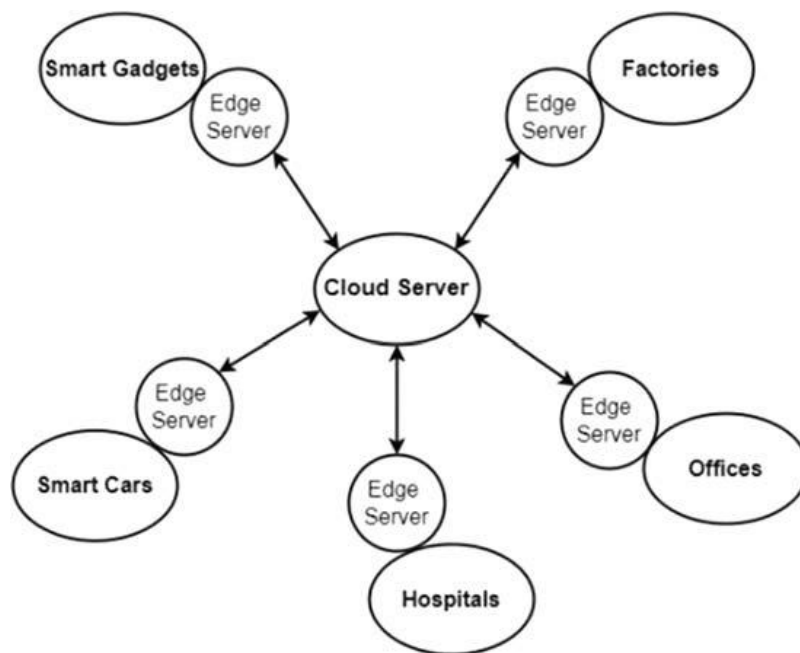


Рисунок 2.4 – Структура периферійних серверів для різних доменів

У медичних додатках, таких як хірургічні операції, периферійні обчислення можуть значно підвищити ефективність і безпеку, забезпечуючи високу швидкість передачі великих обсягів даних до периферійних хмар для

подальшого аналізу і прийняття рішень [21]. Вказані цілі і характеристики периферійних обчислень в IoT допомагають забезпечити високу продуктивність, надійність і безпеку, що є важливими для успішної реалізації різних додатків Інтернету речей.

2.3 Архітектура інтелектуальної системи IoMT

Основним компонентом мікроконтролера (MCU) є центральний процесор, архітектура якого відіграє ключову роль у визначенні ефективності всієї системи [22]. Окрім центрального процесора, периферійні пристрої включають архітектуру вводу-виводу, яка забезпечує з'єднання з датчиками для збору даних. Ця архітектура дозволяє інтегрувати мікроконтролери з різними сенсорами та іншими пристроями, що забезпечує ефективний обмін інформацією в рамках IoT систем.

Енергоспоживання є критично важливим аспектом для пристроїв периферійних обчислень. Ефективне управління енергоспоживанням дозволяє збільшити тривалість роботи пристроїв без необхідності частого підзарядки або заміни батарей. Існує кілька методів управління енергоспоживанням, які можуть бути застосовані для мікроконтролерів [23]:

1. Динамічне масштабування частоти і напруги (DVFS): Цей метод передбачає зміну частоти та напруги центрального процесора залежно від поточного навантаження. Зменшення частоти і напруги під час низького навантаження дозволяє знизити енергоспоживання.

2. Режими сну та очікування: Мікроконтролери можуть переходити в режим сну або очікування під час періодів бездіяльності. Це значно знижує енергоспоживання, оскільки в цих режимах процесор та інші компоненти працюють на мінімальній потужності.

3. Ефективне керування периферійними пристроями: Відключення або переведення в режим низького енергоспоживання непотрібних периферійних пристроїв під час бездіяльності також допомагає знизити загальне

енергоспоживання системи. Обробка даних є однією з основних функцій периферійних обчислювальних пристроїв. Мікроконтролери, які здатні ефективно обробляти дані, можуть виконувати наступні завдання:

- Мікроконтролери можуть виконувати первинну обробку даних, зібраних з датчиків, перед їх передачею до центральних серверів або хмарних платформ. Це може включати фільтрацію, агрегацію та компресію даних.

- Деякі додатки IoT вимагають негайного аналізу даних для прийняття рішень в реальному часі. Мікроконтролери можуть виконувати такі обчислення безпосередньо на периферії, знижуючи затримки і забезпечуючи швидку реакцію.

- На основі проаналізованих даних мікроконтролери можуть приймати рішення та виконувати відповідні дії, наприклад, активацію виконавчих механізмів або надсилання повідомлень. Архітектура центрального процесора мікроконтролера, а також ефективне управління енергоспоживанням і можливості обробки даних є ключовими факторами, що визначають ефективність периферійних обчислювальних систем в контексті IoT. Оптимізація цих аспектів сприятиме розвитку периферійних обчислень, підвищуючи їх продуктивність, надійність і енергоефективність. Загальна архітектура системи показана на рис. 2.5 [23].

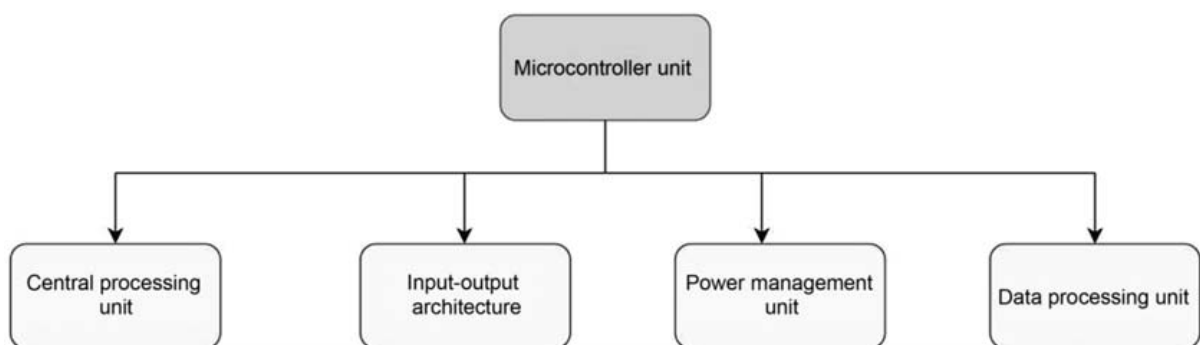


Рисунок 2.5 – Загальна архітектура системи IoT

Багато пристроїв Інтернету речей (IoT) потребують високої обчислювальної потужності, яку можна досягти за допомогою багатоядерної архітектури центрального процесора. Багатоядерні процесори мають кілька незалежних ядер на одному кристалі, що дозволяє розподіляти робоче навантаження між кількома ядрами, забезпечуючи паралельні обчислення та знижуючи енергоспоживання.

Багатоядерні процесори дозволяють виконувати паралельні обчислення, що значно підвищує продуктивність. Це особливо важливо для обробки великих обсягів даних, характерних для IoT пристроїв. Розподіл робочого навантаження між кількома ядрами знижує енергоспоживання, оскільки окремі ядра можуть працювати на нижчих частотах або бути вимкнені, коли вони не використовуються. Це забезпечує ефективне управління енергоспоживанням. У багатоядерних процесорах ядра можуть бути гетерогенними, тобто призначеними для виконання різних функцій. Наприклад, одне велике ядро може бути оптимізоване для високих обчислювальних завдань, тоді як менше ядро може обробляти периферійні запити. Така структура дозволяє оптимізувати використання ресурсів і підвищити загальну ефективність системи. Багатоядерна архітектура забезпечує гнучкість у розподілі обчислювальних завдань і масштабованість системи, дозволяючи легко адаптуватися до змін у навантаженні та вимогах [24].

Приклади застосування:

В інтелектуальних транспортних системах необхідно обробляти великі обсяги даних у реальному часі для забезпечення безпеки та ефективності транспорту. Багатоядерні процесори дозволяють швидко аналізувати дані з датчиків і приймати оперативні рішення.

В медичних додатках, де потрібно обробляти дані з різних сенсорів і забезпечувати швидку реакцію на зміни стану пацієнта, багатоядерна архітектура забезпечує необхідну продуктивність і енергоефективність.

У промислових додатках багатоядерні процесори можуть обробляти дані з численних датчиків і контролювати обладнання в реальному часі, забезпечуючи оптимальну роботу виробничих процесів.

Багатоядерна архітектура процесора забезпечує високу продуктивність при меншому енергоспоживанні, що є критично важливим для ефективної роботи пристроїв IoT. Розподіл обчислювальних завдань між кількома ядрами дозволяє виконувати паралельні обчислення, знижувати енергоспоживання і підвищувати загальну ефективність системи. Гетерогенність ядер додатково підвищує гнучкість і масштабованість архітектури, забезпечуючи оптимальне використання ресурсів для різних типів завдань. У багатоядерних процесорах робоче навантаження розподіляється між кількома ядрами, що дозволяє виконувати паралельні обчислення і знижує енергоспоживання, як показано на рис. 2.6 [24].

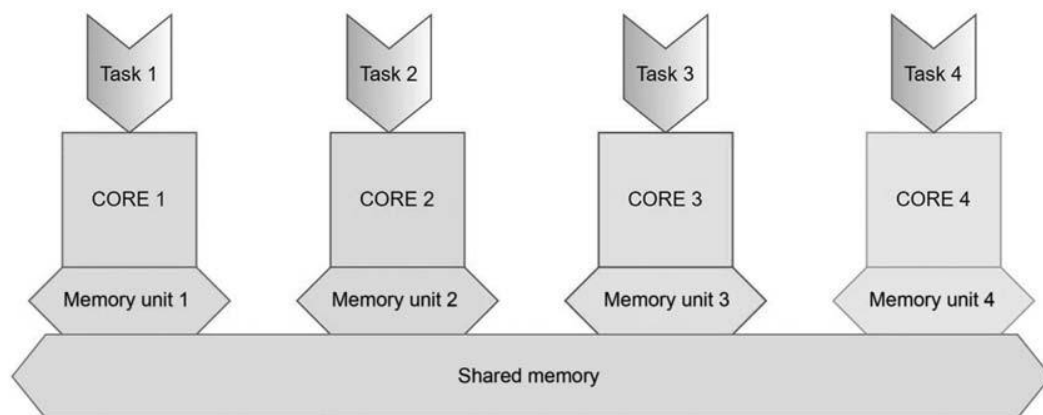


Рисунок 2.6 – Архітектура центрального процесорного блоку

Багатоядерні комп'ютери в архітектурі Інтернету речей (IoT) часто є гетерогенними, тобто різні ядра призначені для виконання різних функцій і структуровані відповідно до завдань, які вони виконують. Наприклад, одне велике ядро може бути використане для високих обчислювальних функцій, тоді як менше ядро в тому ж чипі буде обробляти периферійні запити. Це забезпечує високу продуктивність при зниженому енергоспоживанні, оскільки кожне ядро

виконує лише необхідні завдання і може бути вимкнене окремо, коли не використовується [25].

Енергоспоживання КМОП-мікроконтролерів буває двох типів: динамічне та статичне.

1. Динамічна потужність: Це потужність, яка споживається під час виконання мікроконтролером запрограмованих завдань. Динамічна потужність залежить від частоти перемикання транзисторів і напруги живлення.

2. Статична потужність: Це потужність, яка споживається, коли код не виконується і виникає лише при подачі напруги на пристрій. Статична потужність зумовлена витоками струму через транзистори, навіть коли вони знаходяться в стані спокою.

У системах, що працюють від батареї, статична потужність має більше значення, оскільки більшість таких систем проводить значну частину часу в сплячому режимі. У багатоядерних процесорах динамічне масштабування напруги і частоти (DVFS) може виконуватися на кожному ядрі окремо. Це дозволяє знижувати енергоспоживання шляхом налаштування робочих точок кожного ядра відповідно до поточного навантаження. Основні переваги DVFS:

1. DVFS дозволяє знижувати напругу і частоту роботи ядер під час менш інтенсивних завдань, що зменшує динамічну потужність споживання.

2. Кожне ядро може працювати незалежно, оптимізуючи свої робочі параметри відповідно до поточного завдання. Це дозволяє досягти оптимальної конфігурації системи.

3. Ядра, які не використовуються, можуть бути вимкнені, що зменшує як динамічну, так і статичну потужність споживання. Багатоядерна архітектура процесора забезпечує високу продуктивність при меншому енергоспоживанні завдяки можливості паралельної обробки завдань і гетерогенності ядер, що дозволяє кожному ядру виконувати певні функції. Динамічне масштабування напруги і частоти (DVFS) є ефективним методом управління енергоспоживанням, що дозволяє налаштовувати робочі параметри кожного ядра окремо, забезпечуючи оптимальне використання енергії. Це особливо

важливо для систем IoT, що працюють від батареї, оскільки дозволяє знижувати енергоспоживання під час сплячого режиму і продовжувати термін служби батареї [26].

Різні технологічні процеси мають різні характеристики щодо струму витоку та динамічної потужності. Зокрема, більші технологічні процеси (130-200 нм) мають значно нижчий струм витоку, але за рахунок вищої динамічної потужності. Це означає, що при використанні більших технологічних процесів статична потужність зменшується, а динамічна збільшується.

Енергоспоживання і типи навантажень.

1. Для пристроїв, що працюють від батареї і не потребують високої обчислювальної потужності, великі технологічні процеси можуть бути хорошим рішенням, оскільки статична потужність переважає над динамічною.

2. У випадках, які вимагають великої обчислювальної потужності, динамічна потужність домінує. Тому для таких пристроїв менші технологічні процеси, які мають меншу динамічну потужність, можуть бути кращим вибором.

При спробі оптимізувати як динамічну, так і статичну потужність, стає очевидною необхідність критичного компромісу. Важливо враховувати специфіку застосування пристрою, щоб визначити, що є більш важливим для зниження енергоспоживання системи. Це можна зробити за допомогою бюджетування енергоспоживання. Для вибору правильного MCU, який мінімізує енергоспоживання для конкретної системи, необхідно знати, що має більш значний вплив на систему — динамічна чи статична потужність.

Аналіз розподілу енергоспоживання між статичною та динамічною потужністю допоможе зробити обґрунтований вибір. Різні архітектури процесорів будуть споживати різну кількість енергії за один такт. Важливо враховувати архітектуру набору інструкцій (Instruction Set Architecture, ISA) [27].

Кількість циклів на виконання однієї інструкції впливає на загальне енергоспоживання. Частота тактування процесора впливає на динамічну потужність. Інструкції мають великий вплив на продуктивність пристрою, що безпосередньо впливає на потужність, споживану за один цикл, а отже, і на

загальне енергоспоживання. Для вибору оптимального MCU, який мінімізує енергоспоживання, важливо враховувати як динамічну, так і статичну потужність, архітектуру процесора, кількість циклів на інструкцію та схеми тактової частоти. Бюджетування енергоспоживання та аналіз специфічних вимог до пристрою допоможуть знайти баланс між продуктивністю та енергоефективністю, забезпечуючи оптимальне функціонування пристроїв IoT. Одноядерна та багатоядерна архітектури зображені на рис. 2.7.

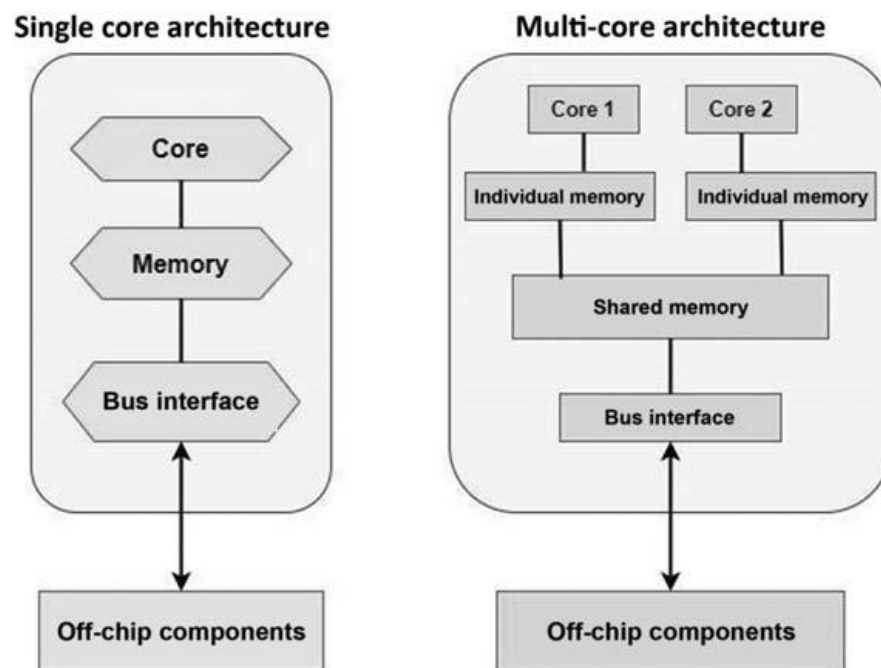


Рисунок 2.7 – Одноядерна та багатоядерна архітектури процесорного блоку системи IoT

2.4 Особливості застосування периферійних обчислень для додатків у сфері охорони здоров'я

Переваги системи охорони здоров'я на основі периферійних обчислень проілюстровані на рис. 2.8. Адаптація периферійних обчислень для системи охорони здоров'я знаходить широке застосування в цій галузі. Незважаючи на значний розвиток та інновації у системах охорони здоров'я, існує багато проблем

з наданням високоякісної медичної допомоги в сільській місцевості. Через відсутність зв'язку та доступу до Інтернету медичні працівники стикаються з труднощами у наданні якісної медичної допомоги людям, які знаходяться далеко від медичних центрів. Всі вищезгадані проблеми можна вирішити за допомогою медичного Інтернету речей (МІоТ) та периферійних обчислень.

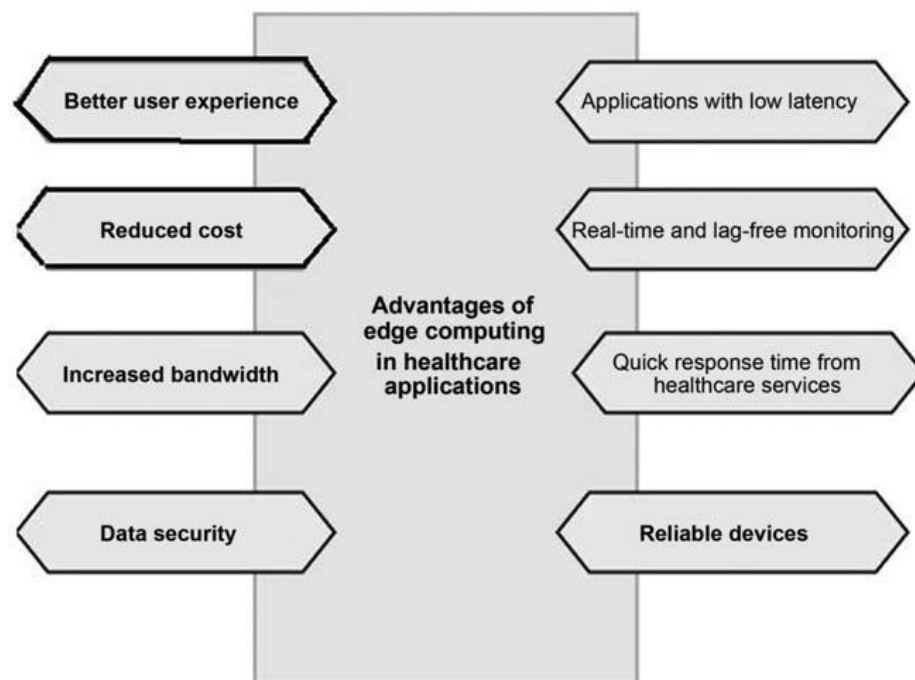


Рисунок 2.8 – Переваги периферійних систем охорони здоров'я

Цілком можливо генерувати, збирати, зберігати та аналізувати дуже важливі дані без постійного підключення до мережі. Діагностувати пацієнтів за допомогою розумних медичних пристроїв дуже просто і швидко, а дані можна легко надсилати на хмарні сервери або центральні сервери з мережею. Крім того, величезні масиви даних, зібрані пристроями медіа-калібрування, такими як глюкометри, датчики, що носяться, і медичні додатки, дозволяють медичним працівникам діагностувати пацієнтів, особливо з хронічними проблемами [28]. Таким чином, периферійні обчислення мають потенціал для розширення якісних систем охорони здоров'я у віддалених районах.

Зазвичай величезні масиви зібраних даних, які можуть бути структурованими або неструктурованими, зберігаються на хмарному сервері. Ці дані мають бути проаналізовані таким чином, щоб можна було отримати висновки за допомогою ефективного аналітичного інструменту. На той час стан здоров'я пацієнта може змінитися. Периферійні обчислення можуть бути ефективно використані для подолання вищезгаданих проблем. Критичний аналіз може бути виконаний на периферійних пристроях, розташованих на межі мережі, що забезпечує швидше отримання результатів і підвищує ефективність надання медичної допомоги [29].

Аналітика в реальному часі на периферійних пристроях може швидко передбачити аномалії, дозволяючи медичним працівникам вжити негайних заходів під час надзвичайних ситуацій. Дані, які не є критично важливими, можна зберігати на хмарному сервері, а інформацію, зібрану за певний період, можна відокремити та проаналізувати за допомогою алгоритмів машинного навчання у віддалених центрах обробки даних.

Використання периферійних рішень у системах охорони здоров'я має безліч переваг, включаючи:

1. Дані обробляються ближче до джерела, що забезпечує швидше прийняття рішень.
2. Периферійні обчислення дозволяють об'єднувати дані з різних пристроїв Інтернету речей (IoT), що забезпечує більш повну картину стану пацієнтів.
3. Ефективніше використання ресурсів дозволяє знижувати витрати на медичне обслуговування.
4. Периферійні обчислення допомагають вести більш точні та актуальні медичні записи.
5. Використання робототехніки та відеообладнання покращує якість медичних операцій.
6. Використання медичних пристроїв, таких як інсулінові насоси, розумні лінзи та кардіостимулятори, дозволяє постійно моніторити стан здоров'я пацієнтів.

7. Носимі пристрої відстежують різні показники здоров'я, такі як частота серцевих скорочень, кількість пройдених кроків та рівень гідратації.

8. Датчики та аналіз даних допомагають оптимізувати використання медичних установ.

9. Розумні пристрої спрощують процес запису на прийом до лікаря.

Розумні медичні пристрої є ключовими випадками використання периферійних обчислень, що трансформують взаємодію з клієнтами в галузі охорони здоров'я. Компанії, що займаються периферійними обчисленнями, можуть співпрацювати з медичними працівниками для поліпшення якості послуг. Багато лікарень надають пацієнтам інтерактивний освітній контент, який може бути доступним зі зменшеною затримкою завдяки граничним центрам обробки даних. Інновації в ланцюжку поставок Інтернету речей в охороні здоров'я сприяють підвищенню операційної ефективності і є однією з найбільш привабливих сфер застосування периферійних обчислень [30].

Достатня пропускна здатність є головною проблемою, яка має фундаментальне значення для впровадження бездротових мереж 5G. Аспекти безпеки медичних пристроїв та інтероперабельності також є важливими проблемами. Вартість є ключовим фактором для забезпечення достатньої пропускної здатності. Архітектура розподілених периферійних обчислень є менш витратною, оскільки дані зберігаються на місці і не потребують передачі на великі відстані до хмарних серверів. Однак вона не є ефективною для зберігання великих обсягів даних. Периферійні обчислення можуть забезпечити кращу безпеку, оскільки дані не передаються на далекі відстані, як це відбувається у випадку хмарних обчислень [31]. Проблеми системи охорони здоров'я на основі периферійних обчислень представлені на рис. 2.9. Існує менша ймовірність загальносистемних збоїв в роботі периферійної архітектури, але вона не є надійною для зберігання великих обсягів даних.

Вибір відповідного інструменту периферійних обчислень для різних сценаріїв охорони здоров'я є важливою проблемою. Через проблеми з конфіденційністю важко впроваджувати програмне забезпечення з відкритим

вихідним кодом у системи охорони здоров'я. Необхідно заохочувати медичних працівників до впровадження інновацій. Медичні працівники повинні бути готові до впровадження нових датчиків, які надають інформацію в режимі реального часу.

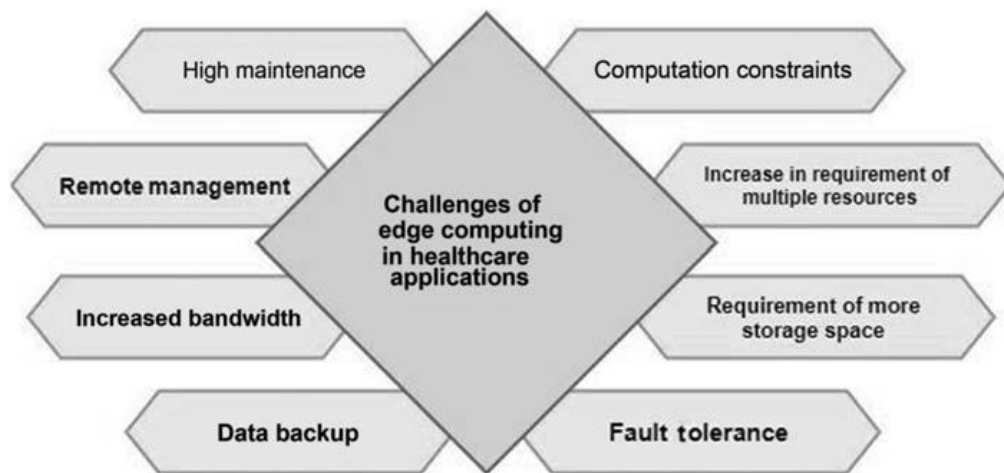


Рисунок 2.9 – Виклики периферійної системи охорони здоров'я

Периферійні обчислення в охороні здоров'я є специфічними для конкретної галузі і потребують підтримки з боку медичних організацій. Схвалення з боку медичних експертів є важливим викликом. Медичні експерти повинні давати творчі ідеї та допомагати у розробці сценаріїв використання периферійних обчислень для інтелектуальної системи охорони здоров'я в режимі реального часу.

Основні проблеми периферійних обчислень в охороні здоров'я включають: Периферійні пристрої мають обмежену ємність для зберігання великих обсягів даних. Використання програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом може бути ускладнене через вимоги щодо конфіденційності даних. Для успішного впровадження необхідна підтримка та схвалення з боку медичних експертів, які повинні брати активну участь у розробці та впровадженні нових технологій.

Периферійні обчислення (Edge Computing) мають значний потенціал для трансформації сфери охорони здоров'я. Нижче наведено основні висновки та перспективи:

Очікується, що до 2025 року 75% даних буде генеруватися на периферії, особливо через пристрої IoT у сфері охорони здоров'я. Цей підхід дозволяє обробляти дані ближче до місця їх створення, що знижує затримку передачі, покращує безпеку даних і забезпечує швидкість обробки.

Периферійні обчислення вже демонструють ефективність у таких напрямках:

- Моніторинг пацієнтів у режимі реального часу: Особливо корисно в інтенсивній терапії та невідкладній допомозі.
- Віддалений догляд і телемедицина: Забезпечення якісної комунікації між пацієнтами та лікарями через відео-конференції та інші інструменти.
- Розумні носимі пристрої: Наприклад, фітнес-браслети, Apple Watch, які відслідковують життєві показники.
- Управління лікарняними процесами: Логістика, управління ліками та оптимізація внутрішніх операцій.

Основні переваги/

- Зниження затримок: Дані обробляються локально, що зменшує залежність від центральних серверів.
- Покращення безпеки: Менше передавання даних через публічні мережі знижує ризики їх перехоплення.
- Підвищення швидкості: Швидша реакція пристроїв та систем завдяки локальній обробці.

Виклики, які вирішуються периферійними обчисленнями.

- Управління хронічними захворюваннями: Постійний моніторинг пацієнтів із діабетом, серцево-судинними захворюваннями тощо.
- Дистанційна діагностика: Забезпечення надійного обміну інформацією між пацієнтом і лікарем.

- Роботизована хірургія: Потребує точності та швидкого обміну даними між роботами та лікарями.

Ключові технологічні аспекти/

- Покращення підключення завдяки 5G.
- Децентралізація вузлів обробки даних, що дозволяє носимим пристроям бути чутливішими.
- Безперебійна робота систем інтенсивної терапії та телемедицини завдяки надійним шлюзам.

Периферійні обчислення стають критично важливими для цифрової трансформації охорони здоров'я. Їхній розподілений підхід дозволяє ефективніше управляти даними, підвищувати надійність і безпеку медичних систем. Розвиток цієї технології допоможе втілити інноваційні рішення, які покращать догляд за пацієнтами і загальну ефективність охорони здоров'я.

Управління величезною кількістю медичних даних у реальному часі є одним із найбільших викликів сучасної медицини. Периферійні обчислення пропонують революційний підхід до вирішення цієї проблеми через децентралізацію обробки даних і фокус на їх обробку ближче до місця генерації. Нижче наведені основні аспекти:

Завдяки локальній обробці:

- Децентралізовані блоки обробки дозволяють кожному джерелу даних виконувати обчислення локально.
- Виявлення аномалій у реальному часі сприяє швидкому реагуванню на критичні ситуації.
- Це особливо важливо для таких сфер, як моніторинг у відділеннях інтенсивної терапії або управління хронічними станами, де час є критичним фактором.

Периферійні обчислення дозволяють:

- Оптимізувати управління даними за рахунок зменшення навантаження на централізовані сервери.

- Локальна обробка знижує потребу у великих централізованих ресурсах і мінімізує затрати на передачу даних.

- Менше людського втручання завдяки автоматизації процесів.

Покращена конфіденційність та безпека.

- Відсутність сторонніх хмарних сховищ: Дані залишаються в межах лікарняної периферійної мережі, зменшуючи ризики витоку.

- Захищений обмін між пацієнтом і медпрацівником: Обробка на локальних пристроях забезпечує конфіденційність персональних медичних даних.

- Менша вразливість до кібератак: Розподілена архітектура ускладнює централізовані атаки на систему.

Поєднання периферійних і когнітивних обчислень відкриває нові можливості:

- На основі зібраних даних системи адаптують послуги до потреб кожного користувача. Наприклад, динамічне налаштування рекомендацій для лікування або зміна режиму моніторингу в залежності від стану пацієнта.

- Швидке оброблення даних дозволяє алгоритмам прогнозувати та попереджати про потенційні ризики, як-от загострення хронічних хвороб.

Потенційні сценарії застосування/

- Екстрені ситуації: Реакція в реальному часі на підставі даних, що надходять від пристроїв життєзабезпечення.

- Віддалений догляд: Пацієнт отримує рекомендації майже миттєво завдяки локальній обробці даних з носимих пристроїв.

- Управління даними лікарень: Конфіденційна обробка даних про ліки, логістика і оптимізація лікарняних операцій.

Периферійні обчислення є не лише ефективним способом управління медичними даними, але й вирішальним кроком до створення більш інтелектуальної, персоналізованої та безпечної системи охорони здоров'я. Ця технологія не лише покращує обробку даних, але й відкриває нові горизонти для підвищення якості медичних послуг [32].

2.5 Висновки до розділу 2

Периферійні обчислення (Edge Computing) активно трансформують інтелектуальні системи охорони здоров'я завдяки оптимізації роботи пристроїв IoT. Головним завданням є створення апаратних рішень з низьким енергоспоживанням, які можуть ефективно обробляти дані на місці їх генерування, знижуючи затримки та витрати на передачу даних.

Для ефективності периферійних обчислень важливо враховувати:

- Мікроконтролери та процесори з низьким енергоспоживанням: Використання спеціалізованих чипів (наприклад, ARM Cortex-M або RISC-V), оптимізованих для роботи з невеликими обсягами енергії.
- Енергоефективні мережеві модулі: Вбудовані рішення для бездротового зв'язку (Wi-Fi, BLE, 5G), що мінімізують витрати енергії при передачі даних.
- Адаптивні схеми живлення: Використання технологій, які регулюють енергоспоживання залежно від робочого навантаження.

Архітектури з низьким енергоспоживанням є ключем до ефективного впровадження периферійних обчислень в інтелектуальні системи охорони здоров'я. Незважаючи на виклики, такі рішення відкривають нові можливості для поліпшення медичних послуг, підвищення конфіденційності даних і зниження операційних витрат.

3 КОНВЕРГЕНТНА МЕРЕЖЕВА АРХІТЕКТУРА 5G ТА MEC

3.1 Технологічні можливості периферійних обчислень в мережах 5G з множинним доступом

У сучасну епоху мереж 5G та інтернету речей (IoT) концепція обчислень на периферії (MEC – Multi-access Edge Computing) суттєво змінила підхід до використання обчислювальних ресурсів. Замість залежності від централізованих хмарних обчислень, периферійні пристрої, такі як мобільні термінали, базові станції (gNodeB) та інші вузли RAN (Radio Access Network), дозволяють виконувати частину обчислень локально. Наведемо ключові аспекти та переваги впровадження MEC у мережах 5G:

1. Завдяки локалізації обчислювальних ресурсів MEC дозволяє досягти мінімальних затримок (практично до «нульової»), що критично для додатків реального часу, таких як автономні транспортні засоби, AR/VR, AI та інші.

2. Використання планувальників завдань дозволяє розподіляти навантаження між хмарою та периферією. Це усуває "вузьке місце" в централізованих серверах та забезпечує більш ефективне управління ресурсами.

3. RAN на основі 5G-NR забезпечує швидкість передачі до 20 Гбіт/с на пристрій, що дозволяє обробляти великі обсяги даних у реальному часі. Це ідеально підходить для додатків, які вимагають високої пропускної здатності, таких як UHD-відео або моделі машинного навчання.

4. Технології SDR, SDN та NFV:

- SDR (Software-Defined Radio) та SDN (Software-Defined Networking) дозволяють динамічно налаштовувати мережу відповідно до потреб додатків.

- NFV (Network Function Virtualization) спрощує віртуалізацію мережевих функцій, роблячи інфраструктуру більш гнучкою та ефективною.

5. Використання SoC (System on Chip) із вбудованими процесорами зменшує енергоспоживання периферійних пристроїв, зберігаючи високу продуктивність.

6. MEC інтегрує обчислювальні ресурси з периферійними пристроями, забезпечуючи роботу таких технологій, як AR/VR, IoT, AI, ML та автономний транспорт. Практичні результати MEC у мережах 5G:

- Забезпечення розподілених обчислень дозволяє оптимізувати роботу мережі, зменшуючи затори в хмарних серверах.
- Збільшення пропускної здатності та надійності мережі сприяє покращенню користувацького досвіду.
- Розгортання периферійних обчислень відкриває нові можливості для реалізації інноваційних бізнес-моделей і сервісів.

Розглянута модель має потенціал для подальшого розвитку, особливо в контексті збільшення вимог до обчислень у технологіях 6G та майбутніх IoT-екосистем [33].

На рис. 3.1 показана структура MEC в мережах 5G.

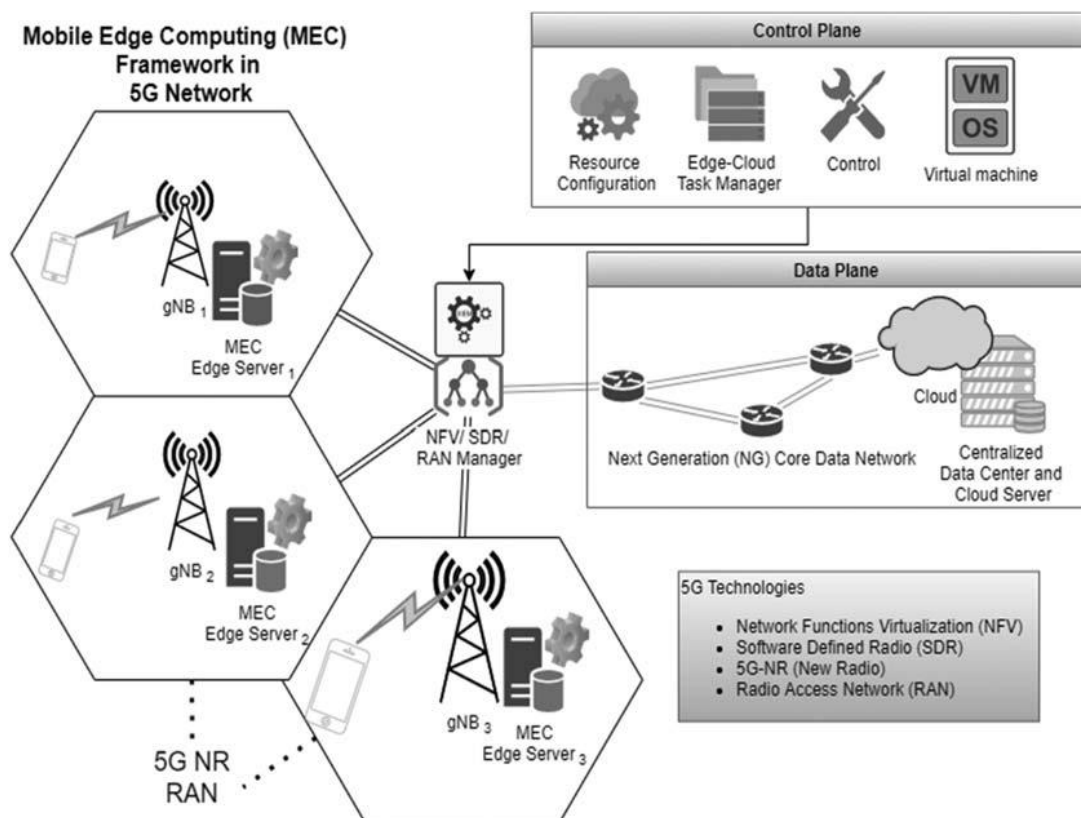


Рисунок 3.1 – Структура периферійних обчислень з багаторазовим доступом в мережі 5G

Структура 5G-MEC, запропонована стандартами 3GPP і ETSI, підтримує основні комунікаційні та обчислювальні функції за допомогою деяких функціональних елементів. Ми представили те ж саме з функціональним поділом системи на площину управління і площину даних.

Концепція MEC (Multi-access Edge Computing) у мережах 5G базується на функціональному поділі системи на дві основні площини: площину управління та площину даних, що забезпечують ефективну роботу комунікаційної та обчислювальної інфраструктури.

Площина управління відповідає за управління ресурсами та планування задач у MEC і 5G RAN. Основні функції:

- Управління ресурсами RAN:

Використання технологій NFV (Network Function Virtualization) та SDR/SDN для динамічного управління радіоресурсами.

- Менеджер завдань та планувальник обчислень:

Забезпечує розподіл додатків між периферійними пристроями (MEC) та централізованою хмарою.

- Додатки з низькими затримками виконуються на периферії.

- Завдання з високими обчислювальними вимогами (наприклад, аналіз великих даних) виконуються в централізованій хмарі.

- Контроль функціональних блоків забезпечує інтеграцію функцій MEC з інфраструктурою 5G для підтримки комунікацій та обчислень.

- Віртуалізація: Підтримка віртуальних машин для ефективного використання ресурсів. Це дозволяє гнучке налаштування інфраструктури під різні додатки.

Площина даних відповідає за передачу даних та маршрутизацію між різними вузлами. Основні функції:

- Мережа передачі даних: Підтримка пакетної комутації через стек TCP/IP у мережах 5G.

- NG-мережа (Next-Generation) здійснює маршрутизацію та пересилання пакетів через RAN, забезпечуючи мінімальну затримку.

- Централізовані обчислення: Хмарні сервери та центри обробки даних забезпечують зберігання інформації та виконання складних обчислювальних задач.

Переваги MEC у 5G.

1. Зниження затримок: Обчислення виконуються ближче до користувача, що забезпечує практично нульову затримку для критично важливих додатків, таких як AR/VR, автономні транспортні засоби, аналітика в реальному часі.

2. Розвантаження хмарної інфраструктури: Розподілене виконання завдань дозволяє зменшити навантаження на централізовану хмару.

3. Інтеграція з базовими станціями (gNodeB): Периферійні пристрої отримують обчислювальні та мережеві ресурси, що дозволяє виконувати завдання локально.

4. Гібридний підхід (Edge-Cloud): Використання платформ як послуги (PaaS), програмного забезпечення як послуги (SaaS) та інфраструктури як послуги (IaaS) безпосередньо в RAN. Це оптимізує роботу додатків і дозволяє використовувати MEC у поєднанні з хмарою.

5. Підтримка нових сервісів: Рішення MEC є ключовим для технологій, які потребують великої швидкості обробки даних, наприклад, відеопотоки 4K, аналізи в реальному часі, машинне навчання та IoT.

Структура MEC у 5G дозволяє оптимізувати ресурси та покращити якість сервісу за рахунок локалізації обчислень і ефективного використання комунікаційних можливостей мережі. Це створює умови для впровадження інноваційних технологій і сервісів у сфері мобільного зв'язку [34].

3.2 Багаторівнева сервіс-орієнтована архітектура мережі 5G MEC

Розділення додатків - це стратегія, яка використовується в 5G і обчислювально-комунікаційній структурі на основі MEC. На рис. 3.2 показано структуру розділення додатків для архітектури 5G на основі MEC. Розділення додатків у MEC-архітектурі 5G є ключовою стратегією для оптимізації

використання обчислювальних ресурсів та забезпечення високої ефективності системи. Вказана концепція передбачає розподіл обчислювальних завдань між трьома основними рівнями: периферійною обчислювальною інфраструктурою, централізованою хмарною інфраструктурою та користувацькими пристроями.

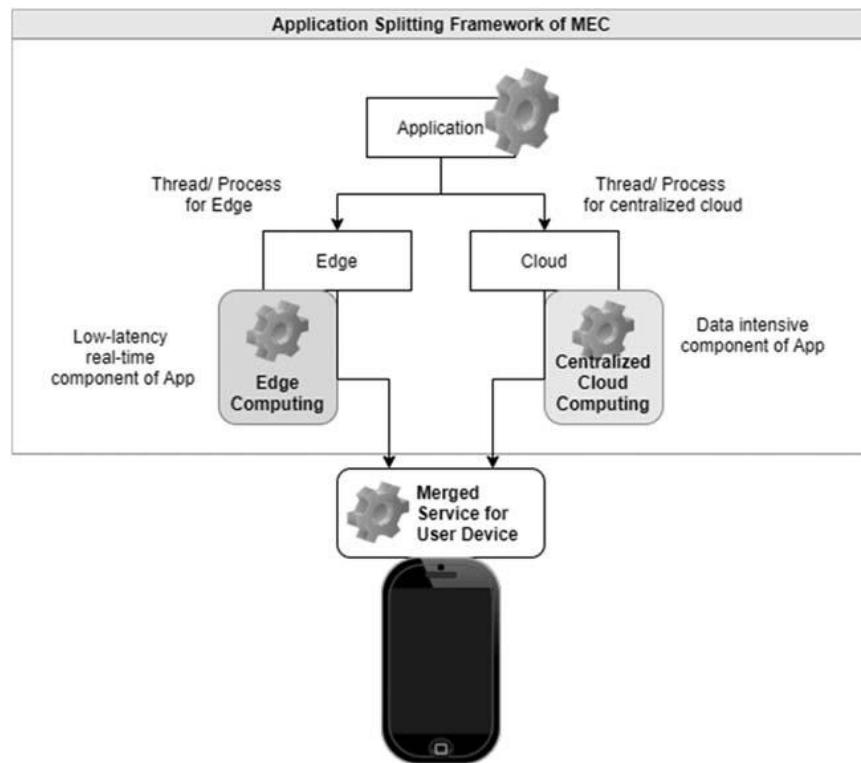


Рисунок 3.2 – Алгоритм розділення додатків з використанням MEC в мережі 5G

Структура розділення додатків.

1. Рівень периферії (MEC).

- Завдання, що потребують мінімальної затримки та обробки в реальному часі, виконуються на периферійних обчислювальних вузлах (наприклад, базових станціях gNodeB).

- Типові приклади: обробка даних для AR/VR, ігрових сервісів у реальному часі, аналіз сенсорних даних у промислових додатках IoT.

2. Централізований хмарний рівень:

- Завдання, які вимагають значних обсягів обчислень або доступу до великих масивів даних, обробляються централізовано.

- Типові приклади: аналіз великих даних, навчання моделей машинного навчання, складна обробка мультимедіа, зберігання історичних даних.

3. Користувацькі пристрої:

- Завдання, що можуть виконуватися локально на кінцевих пристроях, забезпечуючи інтерактивність додатків.

- Типові приклади: графічний інтерфейс, кешування контенту, виконання легких обчислень. Планувальник завдань є ключовим компонентом, який визначає розподіл підзадач між різними рівнями системи:

- Прийняття рішень: На основі параметрів програми (затримка, обсяг даних, енергоспоживання) визначається, які компоненти будуть виконуватися на периферії, у хмарі чи на кінцевому пристрої.

- Оптимізація ресурсів: Забезпечується баланс між використанням периферійних і централізованих ресурсів, враховуючи поточне навантаження та доступність.

- Координація: Забезпечується синхронізація обчислень між різними вузлами системи для ефективного виконання додатків. Координація мільйонів і мільярдів завдань у масштабах глобальної мережі є складною задачею.

Енергетична ефективність: Баланс між швидкістю виконання завдань і мінімізацією енергоспоживання.

Мережеві затримки: Хоча МЕС зменшує затримки, синхронізація між периферією та хмарою потребує оптимізації. Розподілені обчислення збільшують поверхню атак, що потребує інтеграції надійних методів захисту даних та комунікацій. Периферійна інфраструктура включає різні типи пристроїв з різною потужністю та можливостями, що ускладнює оптимальний розподіл завдань.

Переваги розділення додатків.

- Підвищення продуктивності додатків: Виконання завдань ближче до користувача зменшує затримки та покращує користувацький досвід.

- Ефективність ресурсів: Оптимальний розподіл завдань дозволяє зменшити навантаження на хмару та знизити витрати на обчислення.

- Гнучкість: Додатки можуть адаптуватися до змін умов мережі та навантаження, забезпечуючи стабільну роботу. Розділення додатків у МЕС є важливим кроком до створення більш інтелектуальних та адаптивних мереж, які можуть ефективно обслуговувати сучасні вимоги до обчислень у реальному часі [35].

На рис. 3.3 зображена багаторівнева архітектура для 5G і МЕС. Інфраструктура зв'язку 5G забезпечує платформі низьку затримку і високу швидкість передачі даних для зв'язку. Багаторівнева архітектура для інтеграції 5G і МЕС пропонує модульний підхід, що базується на концепції розшарування.

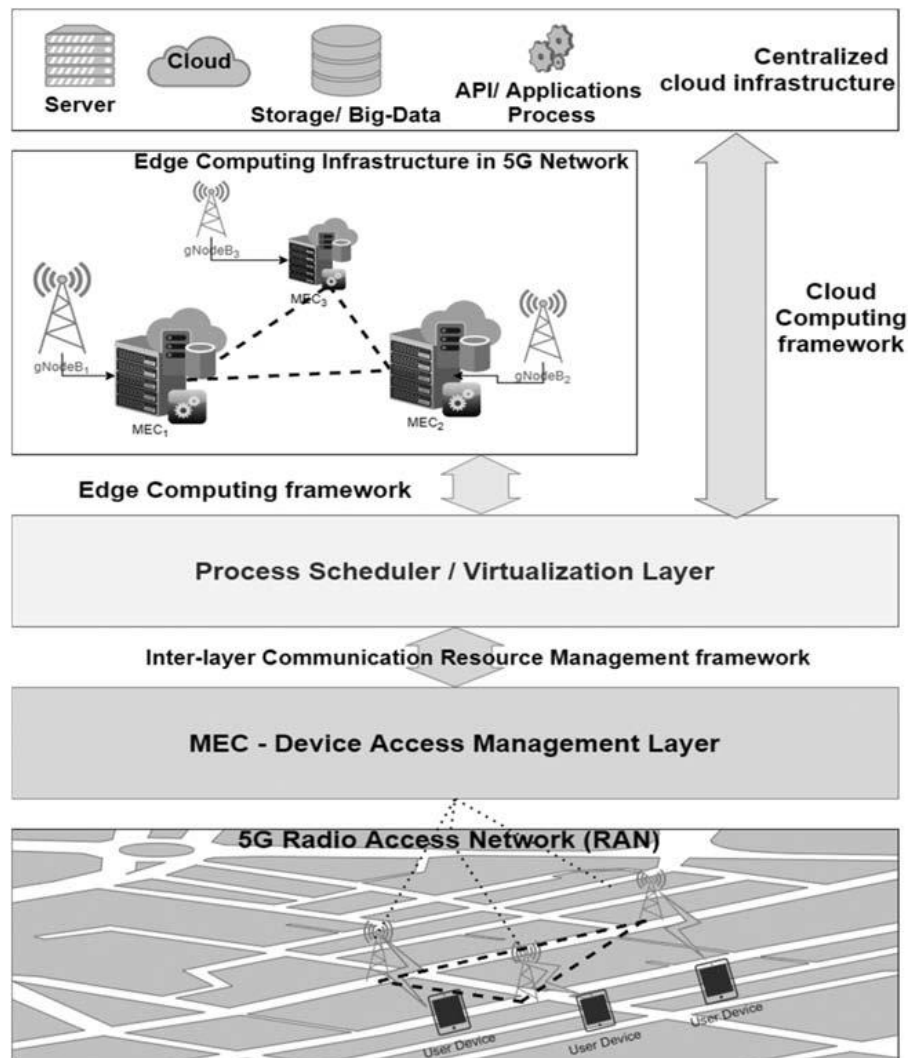


Рисунок 3.3 – Багаторівнева сервіс-орієнтована архітектура для 5G МЕС

Нижче наведено основні аспекти цієї архітектури:

1. Інфраструктура зв'язку 5G забезпечує низьку затримку та високу швидкість передачі даних, що є критично важливими для сучасних додатків. Завдяки IoT і M2M можна керувати мільярдами розумних пристроїв, реалізуючи функції обчислення, контролю та спостереження.

2. Підхід туманних/розподілених обчислень забезпечує гнучкість обчислень, дозволяючи використовувати ресурси ближче до кінцевого користувача. Підтримується на рівні віртуалізації додатків і концепції розділення.

3. Сервіс-орієнтована архітектура базується на концептуальному рівні інтеграції, враховуючи специфікації ETSI та 3GPP (версії 16 і вище). Використовується для поєднання функціональності 5G і MEC.

4. Функції модульної архітектури.

Управління доступом до пристроїв (MDAML) відповідає за обробку даних і контроль для доставки контенту користувачам через мережу 5G RAN. Функціонує на рівні доступу та управління пристроями MEC.

Планувальник процесів – віртуалізація (PSVL) - централізований модуль, який відповідає за управління гібридною обчислювальною платформою. З'єднується з MDAML через логічне міжрівневе з'єднання для інтеграції системи управління ресурсами.

- Розподіляє ресурси між:
- Фреймворком MEC (для периферійних обчислень).
- Централізованою хмарною інфраструктурою (для інтенсивних обчислень).

5. Розшарування - абстрактна концепція, яка включає:

- Модульні блоки для реалізації специфічних функцій.
- Гнучкість у підтримці додатків для різних обчислювальних середовищ (периферія, туман, хмара). Архітектура підкреслює важливість модульності та адаптивності в інтеграції сучасних мережевих та обчислювальних платформ [36].

Периферійні обчислення (MEC) являють собою технологію, де розподілені сервери, розміщені в gNodeB в радіомережах (RAN), обробляють додатки з низькою затримкою і меншою потребою в обчислювальних ресурсах. В 5G-мережах нової радіосистеми (5G-NR), додатки, які потребують негайної обробки, наприклад, додатки доповненої реальності (AR) та віртуальної реальності (VR), будуть оброблятися на обчислювальних платформах MEC. Такі платформи забезпечують мінімальні затримки і високу ефективність, що необхідно для додатків з критичними вимогами до затримки.

Централізована хмарна обчислювальна платформа використовується для обробки додатків з інтенсивним використанням даних. Це включає додатки, що потребують великої кількості ресурсів для аналізу великих обсягів даних, машинного навчання (ML), глибокого навчання, інтелектуального аналізу даних, а також мультимедійних додатків для потокової передачі аудіо та відеоконтенту. Хмарні обчислення забезпечують високу обчислювальну потужність, значні обсяги пам'яті та можливості для зберігання даних. API на основі хмарних обчислень дозволяють запускати процеси з високими вимогами до ресурсів.

З розвитком технологій IoT та 5G, з'являються безпрецедентні потреби у трафіку даних, що стимулює перехід від централізованих хмарних обчислень до периферійних. Нова технологія MEC дозволяє змінити підхід до хмарних обчислень, переміщуючи обробку, управління та зберігання даних ближче до кінцевих користувачів. Це забезпечує велику пропускну здатність, низьку затримку та високу ефективність роботи мережі. Сервери MEC розгортаються для обробки додатків, чутливих до затримок, в безпосередній близькості до кінцевих користувачів.

Попри значні переваги MEC, технологія IoT має обмежені можливості зберігання та обробки даних. Тому для задоволення вимог нових обчислювальних додатків 5G IoT необхідно забезпечити безперебійну обробку великого трафіку даних перед його відправкою в хмару. Конвергенція MEC з 5G є перспективним напрямком, що потребує досліджень і розробок з боку академічних і промислових кіл для успішної реалізації цієї технології.

Розвиток периферійних обчислень та їх інтеграція з хмарними обчисленнями є важливим аспектом еволюції 5G-мереж. Завдяки MEC, додатки з критичними вимогами до затримки можуть ефективно оброблятися на периферії мережі, що забезпечує високу якість обслуговування кінцевих користувачів. Тим часом хмарні обчислення залишаються ключовим елементом для обробки даних з великими обчислювальними вимогами, що підкреслює важливість балансу між периферійними та хмарними технологіями [36].

Периферійні обчислення з множинним доступом (MEC) були стандартизовані Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів (ETSI) разом з Групою галузевих специфікацій (ISG). MEC також була визнана Європейським державно-приватним партнерством з розвитку інфраструктури 5G як ключова технологія для мереж 5G. Визначення ETSI стверджує, що MEC забезпечує середовище IT-послуг і можливості хмарних обчислень на межі мобільної мережі (RAN), в безпосередній близькості до мобільних абонентів. Це дозволяє користувачам отримувати доступ до хмарних сервісів з покращеними обчислювальними можливостями та мінімальними збоями системи.

Розгортання MEC на базових станціях (БС) пропонує декілька переваг та унікальних характеристик:

- У приміщенні центр обробки даних (ЦОД) може працювати ізольовано від інших мереж, маючи доступ лише до локальних ресурсів, що зменшує вразливість до зовнішніх атак.

- Близькість розміщення MEC у найближчому місці дозволяє швидко аналізувати великі обсяги даних і забезпечувати ефективну роботу додатків, які потребують високих обчислювальних ресурсів, таких як AR/VR та аналітика.

- Низька затримка: MEC забезпечує затримку менше 1 мс, що критично важливо для додатків з високими вимогами до часу відгуку.

- Висока пропускна здатність: Забезпечується швидкість завантаження даних до 20 Гбіт/с для кожного пристрою.

- Поінформованість про місцезнаходження: МЕС може відслідковувати місцезнаходження пристроїв, використовуючи інформацію від периферійних розподілених пристроїв в локальній мережі доступу.

- Контекстна інформація про мережу: Доступ до контекстної інформації та даних радіомережі в режимі реального часу дозволяє покращити якість обслуговування та ефективно використовувати мережеві ресурси.

- Підтримка мобільності: МЕС підтримує мобільність до швидкості 500 км/год, що є важливим для транспортних засобів та інших мобільних додатків.

- Безпека та конфіденційність: Забезпечується розширена підтримка шифрування та автентифікації, що гарантує високий рівень захисту даних та приватності користувачів.

МЕС є важливою технологією для розвитку 5G-мереж, що дозволяє покращити продуктивність, безпеку та ефективність обробки даних на периферії мережі. Стандартизація ETSI і підтримка з боку державних та приватних партнерств роблять МЕС ключовим компонентом у забезпеченні високоякісних послуг для кінцевих користувачів [37].

Мобільні хмарні обчислення (МСС) представляють собою поєднання хмарних і мобільних обчислень. МСС створює віртуалізоване середовище в хмарі, яке складається з ресурсів обчислення, зберігання і зв'язку, доступних для кінцевих користувачів віддалено. Це дозволяє користувачам отримувати доступ до обчислювальних потужностей і сховищ даних безпосередньо з мобільних пристроїв, однак обчислення здійснюються централізовано в хмарі. Одним з основних недоліків МСС є затримка і обмежена пропускна здатність, що стимулює розробку нових концепцій, таких як периферійна хмара.

Туманні обчислення (FC) включають додатковий рівень обчислень між хмарию та кінцевим користувачем, що складається з таких пристроїв, як M2M-шлюзи і бездротові маршрутизатори. Ці пристрої, відомі як туманні обчислювальні вузли (FCN), обчислюють і зберігають дані локально перед відправкою в хмару. FCN представляють собою гетерогенну комбінацію вузлів, які підтримують різні протоколи і створюють шар абстракції, приховуючи

складність від кінцевих пристроїв. Це дозволяє значно зменшити затримку та покращити продуктивність додатків, що вимагають обчислювальних ресурсів.

Cloudlet є проміжним рішенням між MCC та MEC, де обчислювальні ресурси розподіляються на меншому масштабі в порівнянні з традиційними хмарними центрами обробки даних. Cloudlet — це "центр обробки даних в коробці", який працює з віртуальними машинами та надає обчислювальні ресурси кінцевим пристроям через мережу WLAN. Cloudlet складається з трьох рівнів [38]:

1. Компонентний рівень: базові елементи обчислювальної інфраструктури.
2. Рівень вузлів: сукупність компонентів, що взаємодіють один з одним.
3. Рівень клаудлетів: об'єднання вузлів для забезпечення комплексної обчислювальної потужності.

Архітектура Cloudlet дозволяє використовувати когнітивні додатки, де основна віртуальна машина та інші віртуальні машини забезпечують когнітивні функції для обробки запитів. Проте основним обмеженням Cloudlet є доступ тільки через Wi-Fi, що обмежує покриття та не забезпечує всепроникні обчислення. Переваги та недоліки.

- MCC забезпечує централізовані обчислювальні ресурси, але має високі затримки та залежність від централізованої хмари.
- FC зменшує затримку за рахунок локальних обчислень, підтримує різні протоколи, але потребує складнішої інфраструктури.
- Cloudlet забезпечує високу продуктивність для локальних обчислень, але має обмежене покриття через використання Wi-Fi.

Кожна з технологій — MCC, FC і Cloudlet — має свої переваги та недоліки, що визначають їх застосування в різних сценаріях. Поява MEC та його стандартизація ETSI дозволяє ефективно інтегрувати периферійні обчислення з хмарними, забезпечуючи низьку затримку, високу пропускну здатність та покращену продуктивність мережі 5G. Це робить MEC ключовою технологією для розвитку майбутніх мобільних мереж та додатків з високими вимогами до обчислювальних ресурсів [39].

3.3 Конвергентна мережева архітектура для 5G з MEC

У сучасну епоху 5G ми стикаємося з гетерогенністю мережевих технологій та реалізацій стека протоколів. Різноманітність комунікаційних технологій обумовлена різними мережами доступу, такими як 5G-NR, Wi-Fi (IEEE 802.11), BLE (IEEE 802.15.1), Zigbee (IEEE 802.15.4), LoRaWAN та навіть супутникові мережі для різних сценаріїв розгортання, які залежать від конкретних додатків. Конвергентна мережева архітектура забезпечує безперебійну роботу в умовах гетерогенних мереж (HetNet).

Конвергентна мережа - це мережа, яка забезпечує основу для безперебійної сумісності та необхідної трансляції на шлюзових пристроях. Вона надає необхідну комунікаційну структуру для інтеграції кількох кластерів HetNet в єдину функціональну мережу для безперебійної роботи. Різні мережеві технології інтегровані разом, щоб працювати як єдина логічна та операційна мережа.

На рис. 3.4 зображено технічну візуалізацію архітектури конвергентної мережі з 5G і MEC. Основна ідея конвергенції полягає у забезпеченні інтероперабельності кооперативної комунікаційної структури для декількох різнорідних мережевих кластерів з гетерогенністю мережевих технологій та реалізацій стеку протоколів (TCP/IP).

У реальному сценарії розгортання мережі неминуча наявність декількох кластерів HetNet. Як ми бачимо на рис. 3.4, різні додатки вимагають різних технологій доступу (як на фізичному, так і на каналному рівні). Зокрема, якщо проаналізувати реалізацію стека TCP/IP протоколу, залежного від фізичного середовища (PMDP) та протоколу конвергенції фізичного рівня на рівні I, а також підрівня управління доступом до середовища на рівні II, то побачимо, що потрібні різні технології доступу, такі як IEEE 802.11 (Wi-Fi), 802.15.1 (Bluetooth), 802.15.4 (Zigbee), LoRaWAN, LTE/5G-NR.

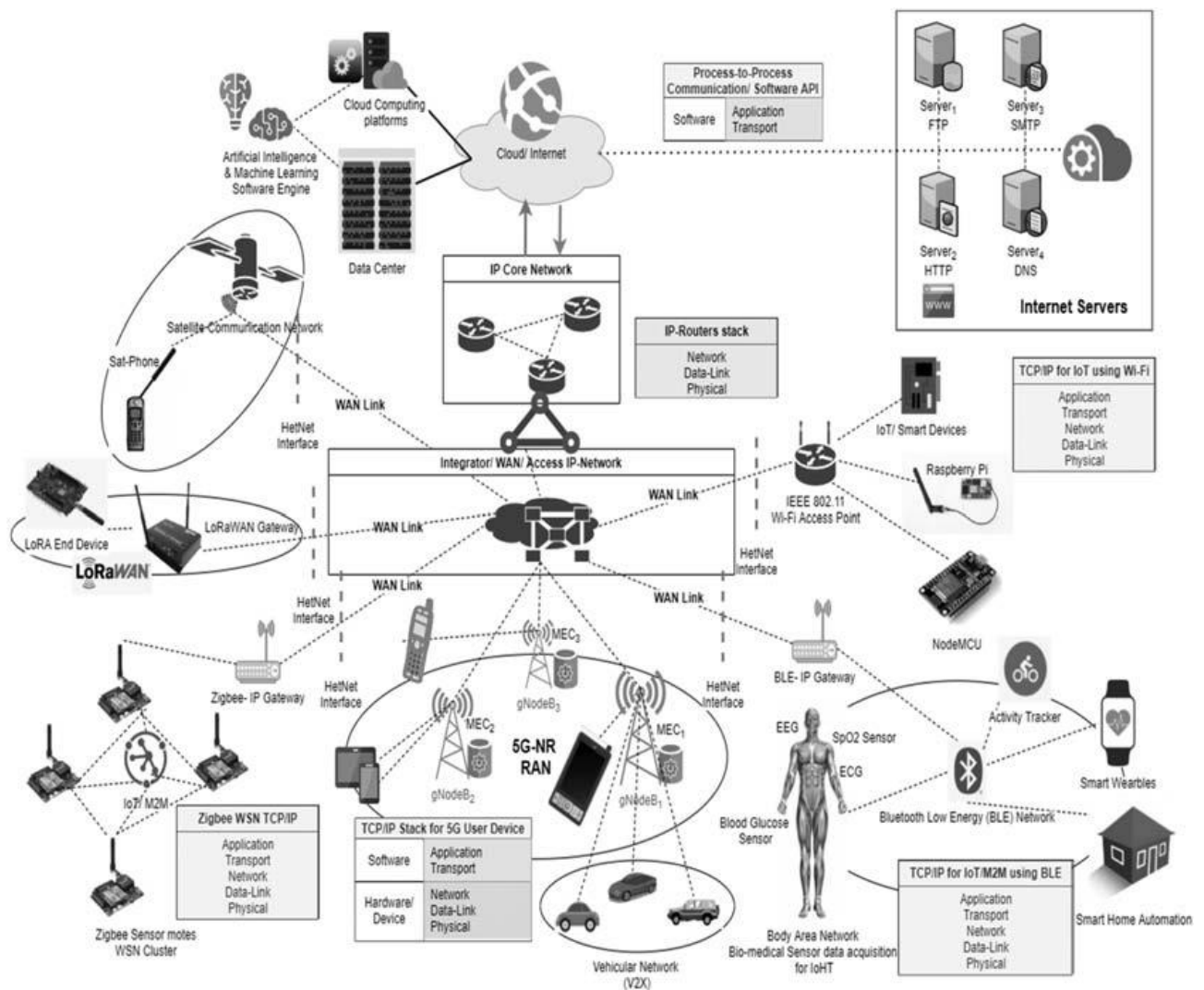


Рисунок 3.4 – Конвергентна мережева архітектура 5G і MEC

Багато додатків на основі IoT використовують IEEE 802.11 як мережу доступу. Додатки WSNs використовують мережу доступу Zigbee (IEEE 802.15.4). Багато розумних медичних пристроїв використовують мережу доступу BLE (IEEE 802.15.1) як бездротову персональну мережу (WPAN). Транспортна мережа часто реалізується за допомогою бездротового доступу IEEE 802.11p у транспортних засобах (WAVE), а також стільникового зв'язку VANET. Деякі з додатків IoT та M2M широко використовують широкосмгову мережу дальнього радіусу дії (LoRaWAN), використовуючи низьку швидкість передачі даних і зв'язок на великі відстані, призначені для IoT та M2M-зв'язку. Навіть мережа доступу на основі супутникового зв'язку може використовуватися у віддалених

районах, де стільниковий зв'язок або інша мережева інфраструктура недоступні [40].

Всі ці мережеві кластери для конкретних додатків можуть бути інтегровані разом та працювати як конвергентна мережа зі стеком TCP/IP та шлюзовими пристроями. Шлюзові та кластерні технології виявилися успішною стратегією для вирішення проблем гетерогенності та інтероперабельності. Всі різні сегменти/кластери мережі доступу інтегруються з існуючою стільниковою мережею 5G за допомогою шлюзів на основі IP та маршрутизаторів доступу до WAN, створюючи конвергентну архітектуру для 5G з підтримкою послуг MEC.

Зв'язок 5G базується на функціях eMBB, URLLC та mMTC без доставки (4G) [41]. Він забезпечує передову комунікаційну платформу для розробки багатьох перспективних додатків, таких як VR/AR, автономний мобільний зв'язок, тактильний IoT. Для задоволення потреб у зв'язку та обчисленнях для 5G було розроблено кілька додаткових технологій, включаючи радіодоступ, управління мережевими ресурсами, мережеву архітектуру та сценарії додатків, енергозбереження та продуктивність системи. До цих технологій належать щільні мережі HetNet, хмарна мережа радіодоступу (C-RAN), неортогональний множинний доступ (NOMA), безпілотні літальні апарати (БПЛА), бездротова передача енергії (WPT), збирання енергії (EH), IoT та ML.

Зі збільшенням використання мобільних пристроїв та Інтернету речей (IoT) експоненціально зростає трафік даних в мережах зв'язку. Таким чином, для оптимізації використання мережі та мінімізації кількості пристроїв, конвергенція є новим рішенням. Однак Multi-access Edge Computing (MEC) може використовуватися в трьох категоріях, таких як послуги, орієнтовані на споживача, послуги сторонніх операторів і поліпшення якості зв'язку в мережі. Платформа MEC повинна створити середовище підтримки для всіх цих послуг на межі мережі [42].

Користувачі можуть отримати вигоду від розвантаження обчислень на периферії. Таким чином, орієнтовані на користувача додатки, такі як AR/VR, ігри, великі дані, відстеження місцезнаходження, безпека і конфіденційність,

чутливі до затримок сервіси (наприклад, дистанційна хірургія через тактильний інтернет) та QoE (продуктивність мережі) в 5G потребують конвергенції з МЕС для підтримки нової архітектури і прогресу в нових технологіях.

Сценарії конвергенції 5G і МЕС включають:

1. NOMA (Неортогональний множинний доступ)
2. EH (Збирання енергії)
3. WPT (Бездротова передача енергії)
4. Зв'язок за допомогою БПЛА
5. IoT
6. H-CRAN (Гібридна хмарна радіодоступова мережа)
7. ML (Машинне навчання)
8. VM (Віртуальні машини)
9. SDN (Програмно-визначена мережа)
10. NFV (Віртуалізація мережевих функцій)
11. Розгалуження мережі/

Крім цих технологій, блокчейн може бути інтегрований з МЕС для надання різних переваг, пов'язаних з контекстом хмари речей.

На рис. 3.4 ми розглянули конвергенцію 5G з МЕС, де базові станції (БС) 5G та мобільного Інтернету об'єднані, а периферійні сервери розташовані таким чином, що БС може безпосередньо керувати ними. Водночас БС може отримати доступ до даних Інтернету і даних датчиків IoT, забезпечуючи ефективну і швидку обробку інформації на межі мережі [43].

3.4 Інтеграція ШІ і 5G для додатків у сфері охорони здоров'я з підтримкою МЕС

Масштабованість сприяє конвергенції зв'язку 5G з периферійними обчисленнями, переміщуючи централізовані обчислення на периферію. Розгортання великомасштабної системи охорони здоров'я з підтримкою МЕС потребує інтеграції штучного інтелекту (ШІ) для надання точних і своєчасних

послуг шляхом аналізу таких факторів, як мобільність користувача, моделі використання пристроїв та моніторинг медичних записів. Останнім часом машинне навчання (ML) і глибоке навчання сприяють прогресу в медичній діагностиці, яка вимагає великих обсягів обробки, обчислень і зберігання даних. Однак централізована хмарна платформа зміщується до периферії, зберігаючи URLLC (ультра-надійний зв'язок з низькою затримкою) як один з ключових факторів, що вимагає периферійної моделі навчання ML для локалізованих даних, щоб забезпечити низьку вартість і низьку затримку.

Категорії машинного навчання включають:

1. Контрольоване навчання
2. Неконтрольоване навчання
3. Навчання з підкріпленням

Ці методи можуть бути використані для розгортання інфраструктури охорони здоров'я, інтегрованої зі штучним інтелектом та 5G, а також з підтримкою МЕС. ІІІ надає важливого значення контекстно-орієнтованій системі охорони здоров'я для персоналізації даних пацієнта, таких як вік, стать і нещодавній стан здоров'я, які можуть бути використані в якості вхідних даних і допомагають лікареві поставити діагноз [43].

Розглянемо одну модель на основі ІІІ, в якій рак легенів був діагностований з більшою точністю, ніж при використанні простого порогового методу. Інші дослідження включають аналіз розладів голосу, передбачення емоцій пацієнта, що допомагає медичному персоналу приділяти більше уваги пацієнту. Однак деякі аспекти, такі як енергоефективність та обчислювальна потужність, потребують подальшого вивчення за допомогою різних моделей навчання ІІІ для досягнення вищої продуктивності системи [44].

Таким чином, конвергенція 5G та МЕС з інтеграцією ІІІ сприяє розвитку нових технологій і забезпечує ефективну інфраструктуру для різних додатків, особливо в сфері охорони здоров'я, де важливі точність, швидкість та надійність обробки даних.

3.5 Висновки до розділу 3

Підхід MEC (Multi-access Edge Computing) та периферійні обчислення відіграють важливу роль у розробці фреймворку додатків для технології 5G і не тільки. Конвергентна мережева архітектура є життєво важливою для вирішення проблем гетерогенності та інтеоперабельності для будь-якого реального сценарію розгортання з використанням декількох гетерогенних мережевих технологій доступу з комунікаційним стеком і обчислювальними платформами. У цьому розділі ми обговорили різні ключові технічні аспекти 5G і MEC для конвергентних мереж.

Стандарти зв'язку 5G (3GPP версії 15 і вище) з новітніми технологіями, що підтримують розподілені обчислення (Fog/Edge/MEC), є ключовим технологічним інструментом для розгортання цілісної конвергентної мережі. Для комунікаційно-обчислювальної платформи нового покоління необхідні сучасні додатки, такі як AR/VR, IoT, M2M, а також наднадійні додатки з низьким рівнем затримок.

Крім того, гібридний обчислювальний підхід, розроблений для належного об'єднання децентралізованих периферійних обчислень (MEC) і централізованих хмарних обчислень, стане розумним індивідуальним рішенням для гетерогенності обчислювальних вимог у різних сценаріях застосування. Технологія 5G і MEC з інтеграцією для HetNet і комунікаційних протоколів (архітектура конвергентної мережі) забезпечать цілісну мультимодальну структуру інфраструктури сенсорики, зв'язку і обчислень, необхідну для сучасної епохи IoT і кіберфізичних систем (CPS).

Розглянуті технології сформують майбутнє з величезним бізнес-потенціалом. Додатки на основі Інтернету речей, такі як «Розумна охорона здоров'я», будуть посилені завдяки поєднанню таких технологій, як 5G і MEC, з конвергентною мережевою архітектурою. IoHT використовуватиме технологічні переваги мережі 5G (низька затримка, наднадійність, висока швидкість передачі даних, розширена підтримка мобільності) для збору даних біомедичних датчиків

через «Інтернет» на основі гібридної обчислювальної моделі MEC і платформ хмарних обчислень для покращення сервісів, призначених для периферійних додатків і хмарного аналітичного механізму, що працює з великими об'ємами даних. Крім того, нові технології, такі як ШІ, нейронні мережі та ML, забезпечать машинний інтелект для інтелектуальних рішень.

Досліджено технології конвергентних мереж на основі 5G і MEC, які забезпечать необхідну технічну можливість для реалізації таких інтелектуальних систем. Ми також представили порівняльний аналіз різних обчислювальних платформ, таких як MEC, мобільні хмарні обчислення (MCC), Cloudlet і FC, і жодна з них не демонструє технічної переваги над іншими. Ідеальне поєднання різних обчислювальних підходів, які використовують технічні переваги і пом'якшують обмеження, буде розумним рішенням для забезпечення гібридної обчислювальної структури для майбутніх систем на основі IoT і CPS, особливо за допомогою комунікаційної інфраструктури, такої як 5G.

Специфічні вимоги до мереж передачі даних завжди демонструють гетерогенність з технологією мережі доступу, а також реалізацією стеку протоколів на фізичному та каналному рівнях. Ми представили перспективи конвергентних мереж для 5G і MEC з технічним оглядом гетерогенності та інтероперабельності за допомогою технологій кластеризації та шлюзів. Також ми розглянули нові галузі досліджень, які мають відношення до 5G, MEC і конвергентних мереж, такі як MEC в охороні здоров'я, інтеграція MEC і 5G, інтеграція MEC з 5G і IoT. Ми обговорили ключові нові напрямки досліджень в контексті HetNet/конвергентної мережевої архітектури для 5G і MEC, беручи до уваги структуру додатків IoT і M2M, а також виклики та проблеми у впровадженні 5G з MEC. Це було б корисно для дослідників, які працюють над цими технічними областями 5G, MEC і конвергентної мережевої архітектури, щоб зосередитися на викликах для вибору цілей і напрямків досліджень і зробити свій внесок у наукову спільноту і суспільство в цілому своїми технічними інноваціями та внесками.

4 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ІНТЕРФЕЙСУ В СЕРЕДОВИЩІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

4.1 Класифікація інтерфейсу «мозок-комп'ютер»

Загалом, BCI (Brain-Computer Interface) можна класифікувати на основі надійності, способу запису та режиму роботи, як показано на рис. 4.1. Щодо надійності, то він може бути залежним або незалежним [45].

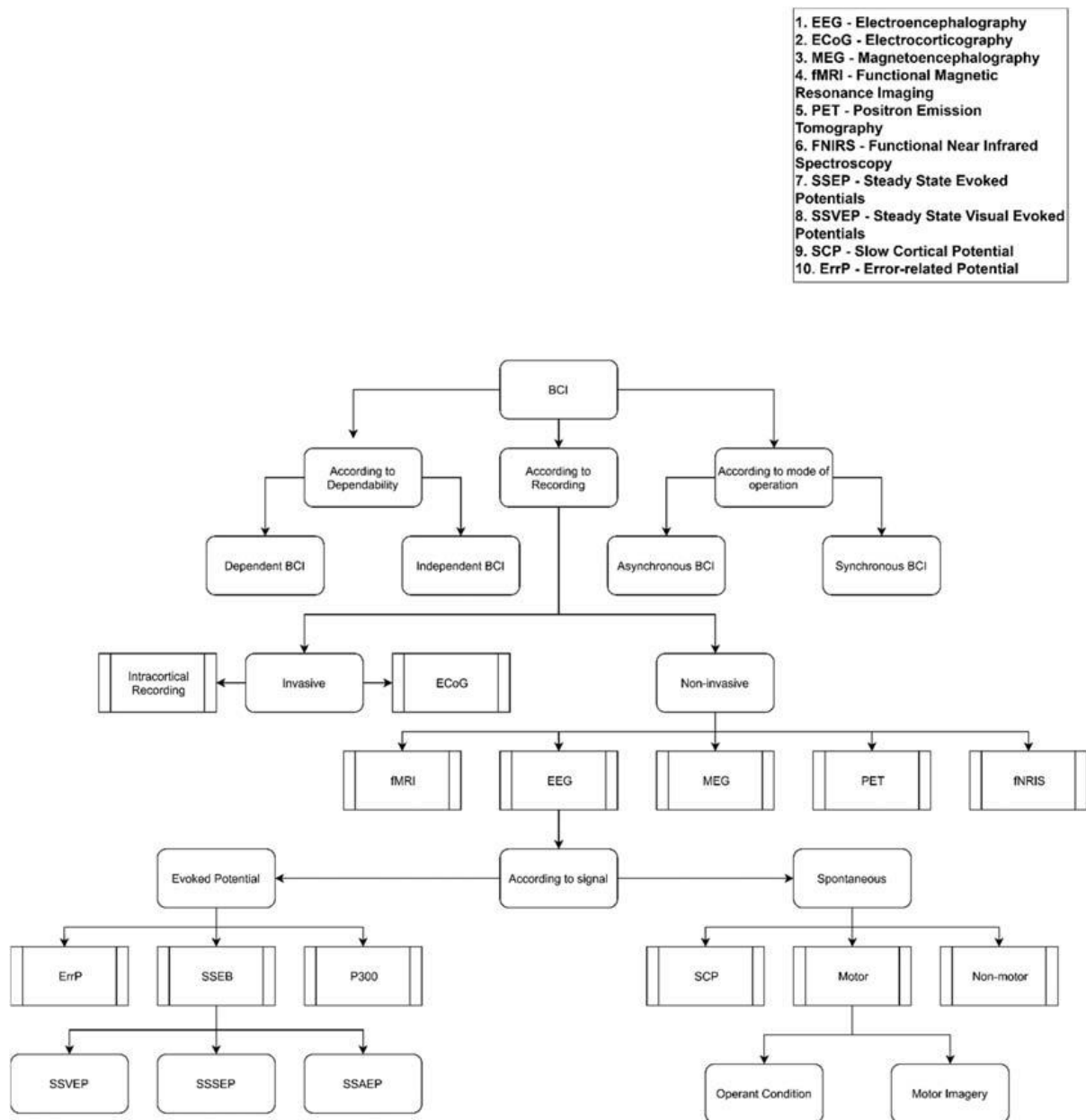


Рисунок 4.1 – Класифікація систем BCI

У випадку залежного BCI необхідне керування двигуном з боку користувача, і навпаки, для незалежного BCI. BCI на основі моторного уявлення (MI) є найкращим прикладом незалежного BCI і є виключно корисним для пацієнтів, які перенесли інсульт, та пацієнтів з обмеженими можливостями [46].

У випадку з методом запису, BCI можна класифікувати як інвазивні та неінвазивні. Зазвичай для отримання сигналу використовуються такі елементи, як датчики, електроди, що застосовуються переважно для запису ЕЕГ (електроенцефалографії). Якщо для реєстрації ЕЕГ використовуються чутливі елементи типу голки або імплантату (зазвичай часто використовують мікроелектродні масиви), то це інвазивний BCI. В більшості неінвазивних застосувань BCI використовуються поверхневі електроди.

Інвазивні BCI забезпечують високу точність сигналу та більшу кількість інформації, оскільки електроди знаходяться безпосередньо в контакті з нейронами. Однак вони мають ризики, пов'язані з хірургічним втручанням, включаючи інфекції та реакції на сторонні тіла. Неінвазивні BCI є більш безпечними, проте можуть мати нижчу роздільну здатність сигналу через перешкоди від скальпа і шкіри [47].

4.2 Ключові елементи інтелектуальних інтерфейсів IoMT

Мозок постійно виробляє електричні сигнали, які можуть бути записані за допомогою електродів на шкірі голови або черепа, які діють як хороші електричні ізолятори. У людини кожен нерв пов'язаний з майже 10 000 інших нервів за допомогою дендритів. Коли нейрони контактують, виникають струми, і електричний сигнал передається по аксону або дендриту шляхом вивільнення нейромедіаторів, які передаються через синапс до дендриту іншого нейрона і знову перетворюються на електричні сигнали.

Коли електричний струм покидає нейрон, він створює позитивну полярність і навпаки. Ці первинні струми в тканинах мозку досягають черепа і шкіри голови, і ці різниці напруг генеруються або вловлюються електродами ЕЕГ. Мільйони

паралельно орієнтованих сусідніх дендритів повинні бути активними синхронно, щоб мати кількісно вимірюваний сигнал.

Метою BCI є розпізнавання та вимірювання активності мозку для позначення мети користувача та інтерпретації особливостей у команди пристрою для виконання намірів користувача в режимі реального часу (рис. 4.2) [48].

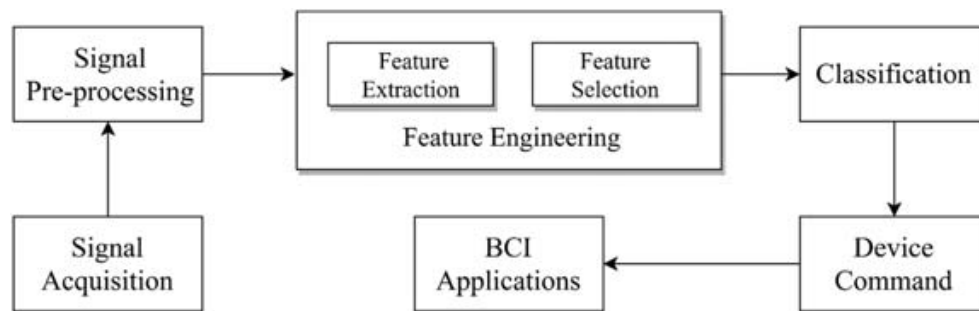


Рисунок 4.2 – Загальна архітектура інтерфейсу «мозок-комп'ютер»

Для досягнення цієї мети BCI, як система штучного інтелекту, призначена для виявлення набору патернів в активності мозку в шість послідовних етапів:

1. Збір сигналів: Використання електродів для запису електричної активності мозку.
2. Попередня обробка: Фільтрація та очищення сигналів від шуму і артефактів.
3. Виділення особливостей: Витягування важливих характеристик з оброблених сигналів.
4. Класифікація: Використання алгоритмів машинного навчання для розпізнавання патернів у виділених характеристиках.
5. Перетворення в команди: Інтерпретація класифікованих патернів у команди для пристрою.
6. Виконання команд: Виконання пристроєм команд, що відповідають намірам користувача.

Ці етапи дозволяють BCI працювати в режимі реального часу, забезпечуючи інтерфейс для користувачів, який перетворює їхні думки і наміри в конкретні дії.

У деяких додатках системи BCI (Brain-Computer Interface) та Інтернету речей (IoT) об'єднуються, щоб створити нову технологію, яка називається системою зв'язку (комунікації) між мозком і речами (Brain-to-Thing Communication, BTC), що використовується, зокрема, в галузі охорони здоров'я. Основна мета — з'єднати невеликі об'єкти, такі як інвалідні візки, з середовищем BCI, щоб допомогти кінцевим користувачам, які страждають від паралічу, БАС і мозкового інсульту. BTC пропонує такі функції, як інтелектуальне середовище, мобільність, прозорість системи, орієнтовані на користувача інтерфейси та підтвердження. Проста архітектура BTC показана на рис. 4.3 [49].

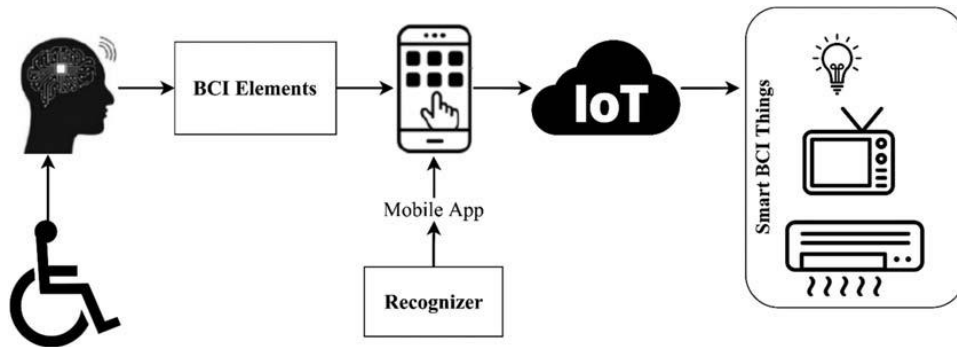


Рисунок 4.3 – Архітектура системи IoMT

З рис. 4.3 видно, що сигнали, які надходять від мозку, можуть бути використані для управління цільовими об'єктами, такими як побутова техніка, за допомогою функцій Інтернету речей. Якщо команди і дані, що використовуються для механізму управління, прості, то достатньо традиційних алгоритмів машинного навчання, включаючи нейронні мережі, розпізнавання образів і класифікатори типу SVM.

Застосування BCI не обмежується контролем лише декількох об'єктів. Оскільки IoT швидко поширюється, очікується, що він розширить свій вплив в інших середовищах, включаючи промисловість, виробництво і транспорт. Хоча для когнітивних систем розпізнавання запропоновано кілька алгоритмів, досягнута точність становить від 70% до 80%, що недостатньо для застосування

в реальному часі. Крім того, вони споживають багато часу при збільшенні обсягу даних [50].

Для підвищення ефективності та точності систем BCI, інтегрованих з IoT, необхідно розробити та впровадити більш досконалі алгоритми машинного навчання і штучного інтелекту. Це дозволить забезпечити більш надійний контроль і управління різними об'єктами, підвищуючи зручність і якість життя користувачів, а також розширить можливості використання технології в різних галузях.

Для створення надійної системи BCI з IoT можна запропонувати фреймворк глибокого навчання (DL) для роботи з великими обсягами даних. Такі фреймворки створюють значний вплив на користувачів BCI, дозволяючи підключати кілька пристроїв і виконувати більше ніж одну задачу. Наявність великих масивів даних ЕЕГ призвела до використання архітектури DL для виявлення потенційної інформації, яка не розпізнається традиційними підходами [51].

Системи BCI досліджувалися за допомогою різних моделей штучних нейронних мереж (ШНМ), таких як:

- CNN (Convolutional Neural Network)
- Машина Больцмана
- RNN (Recurrent Neural Network)
- LSTM (Long Short-Term Memory)
- STNN (Spatio-Temporal Neural Network)
- Багатошарова LSTM-RNN
- GAN (Generative Adversarial Network)

Автокодер (AE) — це метод навчання без учителя, що складається з фаз кодування і декодування. На етапі кодування вхідні сигнали зіставляються з конструктивною ознакою (низьковимірним простором ознак). На етапі декодування фактичні ознаки відновлюються з нижчих ознак [52].

Існує багато архітектур, а саме:

- Стекові енкодери

- Варіаційний автокодер
- Мережа енкодерів, пов'язаних з потенціалом подій (ERP)
- Стекові розріджені енкодери
- Предметно-специфічна багатовимірна емпірична декомпозиція режимів

Ці архітектури можуть бути використані для різних застосувань, таких як: керування роботом; контроль навколишнього середовища; визначення робочого навантаження; моніторинг втоми водія; віртуальна реальність; біометричні системи; розпізнавання емоцій; ігри.

IoT, пов'язаний з різними сценаріями за допомогою фреймворку DL, показаний на рис. 4.4 [53].

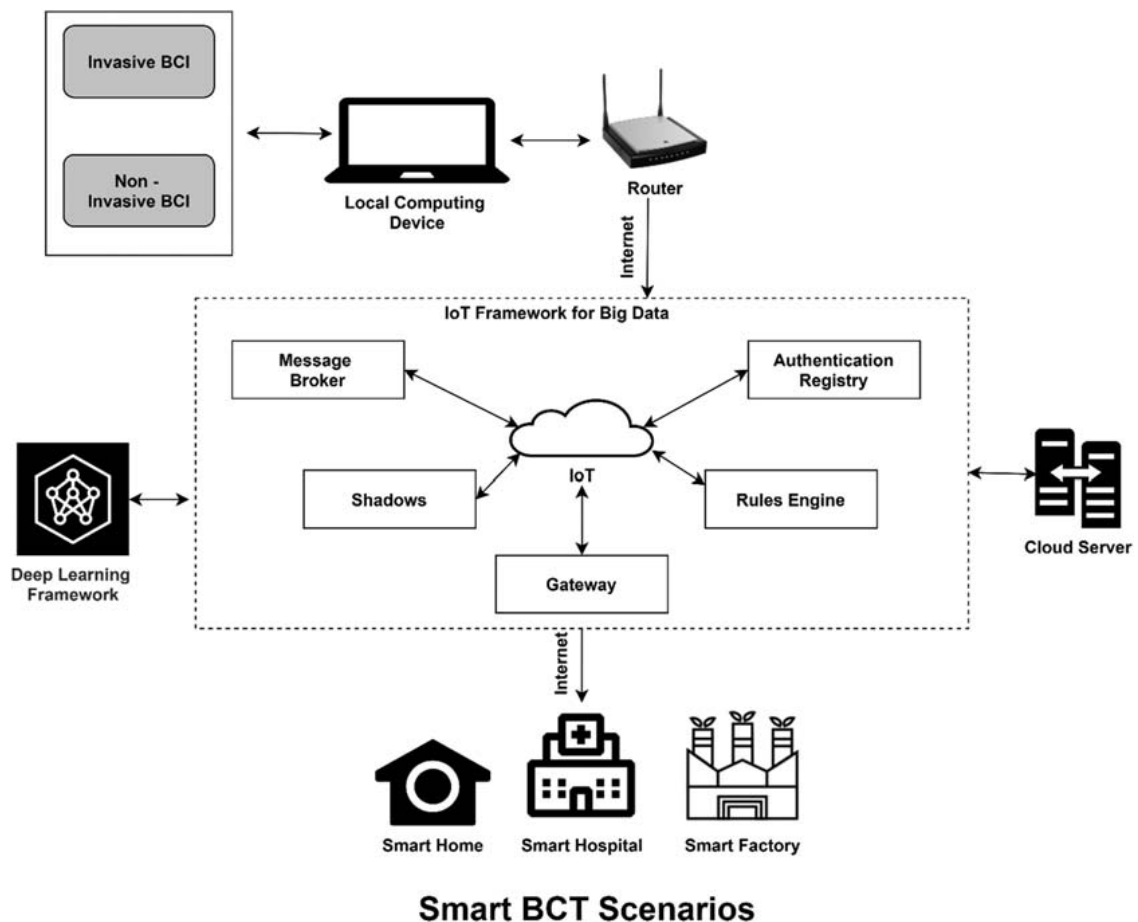


Рисунок 4.4 – Архітектура системи IoT з глибоким навчанням

Використання глибокого навчання в системах BCI та IoT дозволяє не лише підвищити точність і швидкість обробки даних, але й розширити можливості

застосування цих технологій у різних сферах, включаючи медицину, розваги, безпеку та індустрію 4.0. Це сприяє створенню інтелектуальних систем, які можуть ефективно реагувати на потреби користувачів і забезпечувати більш комфортні та безпечні умови життя [54].

4.3 Інформаційна безпека інтелектуальних інтерфейсів

Комунікація «мозок-мозок», яку називають «Інтернетом мізків», є технологічно опосередкованою системою зв'язку, що з'єднує два мізки без участі периферійної нервової системи. Вона складається з двох компонентів:

1. BCI знаходить нейронні сигнали одного мозку і перетворює їх на комп'ютерні команди,
2. Інтерфейс «комп'ютер-мозок» передає комп'ютерні команди до іншого мозку.

Об'єднання людського мозку в мережу призводить до створення мережевого біологічного суперкомп'ютера, здатного функціонувати, незважаючи на мовні бар'єри. Ху [55] пояснив свій експеримент як «перший органічний комп'ютер» із з'єднаними разом мізками. Ці системи експериментували з їхньою здатністю диференціювати два типи електричних стимулів, і вони виявилися кращими, ніж окремі тварини. Після численних випробувань нещодавно досягнуто 80% точності, застосувавши «мозкову мережу» для розшифровки активності, схожої на гру «Тетріс».

У дослідженні Jiang та ін. [56] сигнали ЕЕГ від двох відправників були отримані, записані, розшифровані, перекладені і відправлені людині-одержувачу в мережі. Рішення відправника про те, переміщати чи не переміщати блок у грі, схожій на тетріс, передавалося у вигляді сигналів транскраніальної магнітної стимуляції (ТМС) в потиличну кору головного мозку одержувача. Якщо відповідь була «так», то приймач розпізнавав спалах світла, тобто фосфен. На основі цього досвіду за допомогою ЕЕГ-інтерфейсу приймалося рішення реципієнтом, рухати блок чи ні.

В експериментальне дослідження було включено контроль зворотного зв'язку, щоб дозволити відправникам дати зворотний зв'язок про те, чи прийняли вони рішення, прийняте одержувачем. На основі міжмозкової комунікації достовірність інформації відправників варіюється, щоб перевірити, хто є більш достовірним з точки зору одержувача (рис. 4.5) [57].

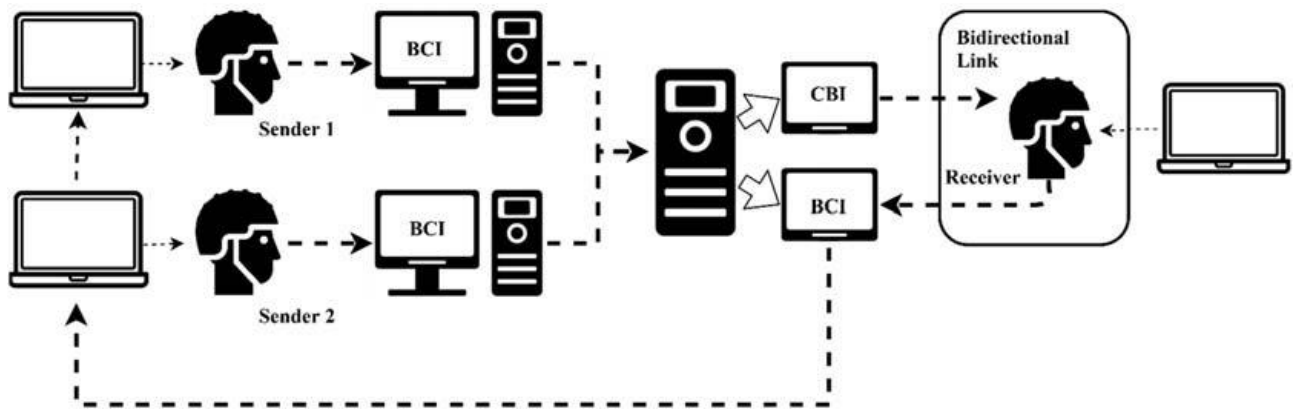


Рисунок 4.5 – Структура сегменту мережі ІоМТ

Граничні обчислення стають більш популярними, ніж хмарні, завдяки тому, що вони обробляють дані, чутливі до часу, тоді як хмарні обчислення використовуються для обробки даних, які не є чутливими до часу. Крім того, їм надають перевагу у віддалених місцях, де зв'язок обмежений або недоступний. Пристрої, підключені в середовищі периферійних обчислень, призначені для дуже швидкого збору та обробки даних на місці, замість того, щоб обертатися навколо великих централізованих серверів, що зберігаються в центрах обробки даних. Вони не зосереджені на зберіганні даних. У традиційних хмарних обчисленнях існують різні обмеження, такі як загрози безпеці, проблеми з продуктивністю і вища вартість операцій. Оскільки інформація, що зберігається в хмарі, використовується нечасто, це призводить до нераціонального використання ресурсів і місця для зберігання. Таким чином, периферійні обчислення допомагають полегшити і локалізувати обробку даних та зменшити залежність від хмари [58].

Граничні обчислення мають багато переваг, а саме:

- Підвищення безпеки та конфіденційності даних
- Покращення продуктивності додатків у більш чутливий та надійний спосіб
- Зниження вартості експлуатації
- Підвищення ефективності та надійності
- Безмежна масштабованість
- Збереження мережових та обчислювальних ресурсів
- Мінімізація затримок

Раджеш та ін. [59] запропонували стабільний інтерфейс «мозок-мозок» з периферійними обчисленнями для допомоги паралізованим пацієнтам після інсульту. Передача думок паралізованої людини, заснована на передачі повідомлень доглядачеві, була розроблена з використанням легкого крихитного симетричного алгоритму (NTSA). Якщо людина підключена до декількох об'єктів, вона може ділитися своїми думками, щоб активувати об'єкт або сповіщати кінцевого користувача. Під час комунікації «мозок-пристрої» або «мозок-мозок» запропоновані методи та алгоритми повинні забезпечувати автентифікацію пристрою, встановлення безпечного каналу, управління пристроєм, конфіденційність даних та їх аналіз. Як показано на рис. 9.6, фреймворк розділений на чотири частини, включаючи консорціумну блокчейн-мережу, середовище Інтернету медичних речей, рівень довірених периферійних обчислень і рівень хмарних сервісів. Як основа інших частин структури, консорціумна блокчейн-мережа складається з декількох медичних і оздоровчих установ.

Центр сертифікації (ЦС) в мережі блокчейн відповідає за автентифікацію зовнішніх пристроїв, що підключаються до VCI, а смарт-контракт в блокчейні управляє даними, що генеруються пристроями VCI, включаючи метадані і політики доступу.

Середовище ВТС відіграє роль джерела даних у фреймворку. Після того, як дані, згенеровані користувачем, зібрані, вони шифруються самим пристроєм або шлюзом і передаються на периферійний обчислювальний вузол для подальшої

обробки. Рівень периферійних обчислень з'єднує середовище BTC і хмарні сервіси для надання послуг з попередньої обробки та зберігання даних. Зокрема, в цій структурі периферійні обчислення інтегрують довірені обчислювальні сервіси на основі Software Guard Extensions, щоб забезпечити цілісність і конфіденційність даних BTC і захистити конфіденційність власників даних. Останній рівень хмарних сервісів відповідає за подальшу обробку даних BTC, попередньо оброблених на рівні периферійних обчислень, таких як аналіз великих даних, прогнозування машинного навчання тощо [59]. Нарешті, команда буде видана відповідним пристроям для активації.

4.4 Висновки до розділу 4

Існує багато обмежень у поточних застосуваннях інтерфейсів мозок-комп'ютер (BCI). Наприклад, програми, що використовують P300, демонструють низьку швидкість передачі інформації (ITR). Крім того, системи, що потребують зовнішніх візуальних стимулів, мають суттєвий недолік, оскільки тривалий вплив таких стимулів може викликати втому або подразнення очей у користувачів.

Попри численні переваги інвалідних візків, керованих за допомогою BCI, існує потреба враховувати різноманітні експлуатаційні виклики. Серед них — подолання несподіваних перешкод, уникнення зіткнень, пересування нерівними поверхнями, підйом сходами, а також пошук і планування оптимального маршруту з урахуванням навігаційних систем GPS.

У додатках для керування курсором або розпізнавання емоцій рівень точності зазвичай становить менше 90%, що є недостатнім для роботи в реальних умовах. Хоча для збору сигналів запропоновано багато методів попередньої обробки даних, вилучення ознак і класифікації, все ще існує потреба у створенні більш ефективного та оптимального підходу. Покращення продуктивності систем BCI вимагає тісної інтеграції апаратного та програмного забезпечення.

Важливою проблемою є розпізнавання активності мозку під час використання біометричних систем, оскільки ці системи дуже чутливі до зовнішніх факторів, таких як емоційний стан користувача. Запис сигналів ЕЕГ (електроенцефалографія) може тривати від 1 до 5 тижнів, але стабільність таких сигналів викликає сумніви. У більшості досліджень питання стабільності сигналів ЕЕГ розглядається недостатньо, що може негативно впливати на надійність систем BCI.

Отже, для підвищення ефективності та надійності інтерфейсів мозок-комп'ютер необхідно розв'язати низку технічних і методологічних проблем, зокрема поліпшити швидкість передачі інформації, забезпечити стабільність сигналів ЕЕГ, а також підвищити точність розпізнавання мозкової активності та рівень інтеграції апаратного і програмного забезпечення.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Інтелектуальні системи та мережі Інтернету медичних речей. Технології периферійних обчислень в системах ІоМТ» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

5.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Інтелектуальні системи та мережі Інтернету медичних речей. Технології

периферійних обчислень в системах ІоМТ» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	53	57	56
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		55,3		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 5.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	66	73	69
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	69,3		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [60]:

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор}, \quad (5.1)$$

де $k_{нов}, k_{теор}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{нов} = 55,3, k_{теор} = 69,3$ балів;
 $0,6$ та $0,4$ – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 55,3 + 0,4 \cdot 69,33 = 60,93 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{нау}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Інтелектуальні системи та мережі Інтернету медичних речей. Технології периферійних обчислень в системах ІоМТ», даний рівень становить 60,93 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Інтелектуальні системи та мережі Інтернету медичних речей. Технології периферійних обчислень в системах ІоМТ», під час планування, обліку і

калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

5.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [60]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p = 24$ дні.

$$Z_o = 18250,00 \cdot 6 / 24 = 4636,38 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Науковий керівник дослідної роботи	18250,00	772,73	6	4636,38
Науковий співробітник	17450,00	750,00	10	7500,00
Інженер-дослідник телекомунікаційних систем та мереж	17430,00	681,82	24	16363,68
Всього				28500,06

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ($З_p$) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Інтелектуальні системи та мережі Інтернету медичних речей. Технології периферійних обчислень в системах ІоМТ» розраховуємо за формулою:

$$З_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{3m}}, \quad (5.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=8000,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [60];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 24$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 8000,00 \cdot 1,70 \cdot 1,15 / (24 \cdot 8) = 81,46 \text{ грн.}$$

$$З_{р1} = 81,46 \cdot 6,00 = 488,75 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Установка обчислювального обладнання для проведення досліджень	6,00	5	1,70	81,46	488,75
Підготовка робочого місця дослідника мереж	4,00	6	2,00	95,83	383,33
Інсталяція програмного забезпечення проведення аналітичного дослідження технології периферійних обчислень	5,00	5	1,70	81,46	407,29

продовження таблиці 5.5

Підготовка дослідних баз даних	12,00	6	2,00	95,83	1150,00
Ведення характеристик базових модулів аналізу моделей мереж	8,00	5	1,70	81,46	651,67
Компіляція програмних модулів системи взаємодії за технологією ІоМ	3,00	6	2,00	95,83	287,50
Налагодження блоків системи	4,00	5	1,70	81,46	325,83
Всього					3694,38

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{доп}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доп}}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де $H_{\text{доп}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 11%.

$$Z_{\text{доп}} = (28500,06 + 3694,38) \cdot 11 / 100\% = 3541,39 \text{ грн.}$$

5.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доп}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (5.6)$$

де H_{zn} – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$3n = (28500,06 + 3694,38 + 3541,39) \cdot 22 / 100\% = 7861,88 \text{ грн.}$$

5.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Інтелектуальні системи та мережі Інтернету медичних речей. Технології периферійних обчислень в системах ІоМТ».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (5.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 4,0 \cdot 98,00 \cdot 1,08 - 0 \cdot 0 = 423,36 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Тека для паперів	98,00	4,0	0	0	423,36
Папір канцелярський офісний COOL-500 (A4)	202,00	2,0	0	0	436,32
Папір для заміток COOL-B (A5)/70	97,00	2,0	0	0	209,52
Органайзер офісний COOL light	144,00	4,0	0	0	622,08
Начиння канцелярське COOL	173,00	4,0	0	0	747,36
Картридж для принтера HP-1568	1920,00	1,0	0	0	2073,60
Диск оптичний COOL-CD/RW	27,00	4,0	0	0	116,64
FLASH-пам'ять BAFF 32GB	230,00	1,0	0	0	248,40
Всього					4877,28

5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Інтелектуальні системи та мережі Інтернету медичних речей. Технології периферійних обчислень в системах ІоМТ», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_6 = 1 \cdot 2600,00 \cdot 1,08 = 2808,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Спеціалізовані радіоінтерфейси	1	2600,00	2808,00
Всього			2808,00

5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{снец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (5.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1,10 \dots 1,12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{спец} = 15400,00 \cdot 1 \cdot 1,08 = 16632,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Фізичне обладнання серверу бази даних	1	15400,00	16632,00
Імітатор передавачів (навантаження)	1	1860,00	2008,80
Імітатор приймача (комутатор)	1	2300,00	2484,00
Всього			21124,80

5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{прог} = \sum_{i=1}^k C_{инрг} \cdot C_{прог.i} \cdot K_i, \quad (5.10)$$

де $C_{инрг}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{прог.i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1,10 \dots 1,12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прз}} = 9485,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 9959,25 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Прикладне програмне забезпечення проектування PCAD 2000 Schematic	1	9485,00	9959,25
Комп'ютерні моделі радіомережі Інтернету речей	1	6820,00	7161,00
Всього			17120,25

5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{\text{обл}} = \frac{Ц_{\text{б}}}{T_{\text{в}}} \cdot \frac{t_{\text{вик}}}{12}, \quad (5.11)$$

де $Ц_{\text{б}}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{\text{вик}}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

T_6 – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (33650,00 \cdot 1) / (2 \cdot 12) = 1402,08 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Обчислювальний центр та комп'ютеризована система проектування	33650,00	2	1	1402,08
Вимірювальний комплекс метрологічної системи	12130,00	4	1	252,71
Програмне забезпечення комп'ютеризованої системи проектування	6560,00	2	1	273,33
Офісна оргтехніка	7830,00	5	1	130,50
Приміщення лабораторії досліджень	500000,00	30	1	1388,89
Робоче місце дослідника мереж	8450,00	4	1	176,04
Всього				3623,56

5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (5.12)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 10,98$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,32 \cdot 160,0 \cdot 10,98 \cdot 0,95 / 0,97 = 562,18 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Обчислювальний центр та комп'ютеризована система проектування	0,32	160,0	562,18
Вимірювальний комплекс метрологічної системи	0,22	160,0	386,50
Робоче місце дослідника	0,09	160,0	158,11
Офісна оргтехніка	0,45	1,3	6,42
Фізичне обладнання серверу бази даних	0,25	50,0	137,25
Імітатор передавачів (навантаження)	0,05	50,0	27,45
Імітатор приймача (комутатор)	0,03	50,0	16,47
Всього			1294,38

5.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Інтелектуальні системи та мережі Інтернету медичних речей. Технології периферійних обчислень в системах ІоМТ» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» відсутні.

5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» відсутні.

5.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (5.13)$$

де H_{ie} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», приймемо $H_{ie} = 50\%$.

$$I_6 = (28500,06 + 3694,38) \cdot 50 / 100\% = 16097,22 \text{ грн.}$$

5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.14)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», приймемо $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (28500,06 + 3694,38) \cdot 100 / 100\% = 32194,44 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Інтелектуальні системи та мережі Інтернету медичних речей. Технології периферійних обчислень в системах ІоМТ» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{доп} + Z_n + M + K_6 + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_6 + B_{нзв}. \quad (5.15)$$

$$B_{\text{заг}} = 28500,06 + 3694,38 + 3541,39 + 7861,88 + 4877,28 + 2808,00 + 21124,80 + 17120,25 + 3623,56 + 1294,38 + 0,00 + 0,00 + 16097,22 + 32194,44 = 142737,62 \text{ грн.}$$

Загальні витрати ЗВ на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ЗВ = \frac{B_{\text{заг}}}{\eta}, \quad (5.16)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta = 0,95$.

$$ЗВ = 142737,62 / 0,95 = 150250,13 \text{ грн.}$$

5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Інтелектуальні системи та мережі Інтернету медичних речей. Технології периферійних обчислень в системах ІоМТ» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \quad (5.17)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo $I=3$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n=0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n=1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n=2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n=3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n=2$;

T_C – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_C=2$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R=4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R=3$; якщо нижче відомих результатів, то $R=1$. Прийmemo $R=4$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B=150250,13$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t=0,08$ років, (1 міс.).

Визначення показників I, n, T_C, R, B, t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [60].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 3^2 \cdot 2 \cdot 4 / 150,3 \cdot 0,08 = 5,75.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Інтелектуальні системи та мережі Інтернету медичних речей. Технології периферійних обчислень в системах ІоМТ» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

5.4 Висновок до розділу 5

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Інтелектуальні системи та мережі Інтернету медичних речей. Технології периферійних обчислень в системах ІоМТ» складають 150250,13 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Інтелектуальні системи та мережі Інтернету медичних речей. Технології периферійних обчислень в системах ІоМТ» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

ВИСНОВКИ

Використання технологій периферійних обчислень у системах ІоМТ дозволило значно скоротити час обробки даних за рахунок їхньої попередньої обробки безпосередньо на пристроях або в їхньому найближчому оточенні. Це сприяє оперативному аналізу інформації, отриманої від медичних сенсорів, і забезпечує швидке прийняття рішень. Інтеграція периферійних обчислень у ІоМТ покращила безпеку та конфіденційність даних. Локальна обробка інформації зменшує ризик перехоплення або втрати чутливих медичних даних під час передачі до централізованих хмарних серверів, підвищуючи надійність функціонування систем. Завдяки зменшенню затримок, властивих традиційним централізованим обчислювальним системам, периферійні обчислення дозволили суттєво підвищити швидкодію медичних додатків. Це особливо важливо для додатків, які вимагають роботи в реальному часі, таких як моніторинг критичних параметрів стану пацієнтів або оперативне управління медичними пристроями.

Розроблені підходи до інтеграції периферійних обчислень у системи ІоМТ сприяли підвищенню ефективності моніторингу стану здоров'я пацієнтів. Це включає використання локальних пристроїв для збирання, обробки та аналізу даних, що дозволяє реалізувати персоналізовані медичні рішення з урахуванням специфічних потреб кожного пацієнта. Використання периферійних обчислень створює умови для впровадження персоналізованої медицини, в якій рішення приймаються на основі індивідуальних параметрів здоров'я пацієнтів. Це дозволяє не лише підвищити якість медичних послуг, але й оптимізувати витрати ресурсів у системах охорони здоров'я. Дослідження підтвердило, що впровадження технологій периферійних обчислень у системах ІоМТ є перспективним напрямом для підвищення ефективності обробки медичних даних, забезпечення конфіденційності та швидкодії в критичних додатках. Розроблені підходи до інтеграції цих технологій сприяють створенню надійних і гнучких рішень, що мають потенціал для покращення якості медичних послуг і вдосконалення систем охорони здоров'я.

Запропоновані підходи до впровадження телекомунікаційних систем IoT дозволили досягти високої швидкості передачі даних, мінімізації затримок та підвищення надійності зв'язку. Це відкриває нові можливості для моніторингу пацієнтів у реальному часі та дистанційного керування медичними пристроями, що сприяє розвитку телемедицини. Розроблена архітектура апаратного забезпечення дозволила створити більш ефективні та енергозберігаючі пристрої для периферійних обчислень. Це сприяє підвищенню автономності IoT-пристроїв, зменшенню їх розмірів та забезпечує можливість інтеграції з різними медичними сенсорами і системами.

Конвергентна архітектура мережі, що об'єднує 5G та периферійні обчислення, забезпечила збільшення пропускної здатності, зниження затримок і можливість масштабування систем IoT. Це дозволяє підтримувати високий рівень обслуговування пацієнтів у складних мережевих умовах, особливо у віддалених або мобільних середовищах. Використання інтелектуальних інтерфейсів у IoT дозволило підвищити зручність і точність взаємодії між користувачами та системами. Інтелектуальні алгоритми адаптації, засновані на машинному навчанні, забезпечили автоматизацію рутинних завдань і покращення персоналізованого обслуговування пацієнтів.

Проведений аналіз економічної ефективності показав, що впровадження систем IoT із периферійними обчисленнями є економічно вигідним рішенням. Зниження витрат на централізовану обробку даних, оптимізація використання енергоресурсів і зменшення потреби у частому обслуговуванні робить ці технології привабливими для медичних закладів і компаній. Отримані результати демонструють високу ефективність запропонованих рішень для IoT. Інтеграція телекомунікаційних систем, периферійних обчислень і сучасних мережевих технологій 5G дозволяє створювати високопродуктивні, гнучкі та економічно ефективні медичні системи нового покоління. Впровадження цих рішень сприятиме покращенню якості медичних послуг, підвищенню доступності охорони здоров'я та розвитку інновацій у цій галузі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abdulraheem, M., Awotunde, J. B., Jimoh, R. G., & Oladipo, I. D. (2021). An efficient lightweight cryptographic algorithm for IoT security. *Communications in Computer and Information Science*, 1350, 444-456.
2. М. Васильківський, Д. Нікітович, і О. Болдирева, «Керування доступом до інформаційних даних в інтелектуальних інфокомунікаційних мережах», ВОТТП, вип. 4, с. 5–17, Вер 2022.
3. Adeniyi, E. A., Ogundokun, R. O., & Awotunde, J. B. (2021). IoMT-based wearable body sensors network healthcare monitoring system. *IoT in healthcare and ambient assisted living* (pp. 103-121). Singapore: Springer.
4. Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2022). Інтелектуальна оптимізація інфокомунікаційних мереж множинного доступу. *Вісник Хмельницького національного університету*, (6), 32–39. doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6(2)-32-39
5. Al-Turjman, F., Nawaz, M. H., & Ulusar, U. D. (2020). Intelligence in the Internet of medical things era: A systematic review of current and future trends. *Computer Communications*, 150, 644-660.
6. Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2023). Інтелектуальний радіоінтерфейс з підтримкою штучного інтелекту. *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки*. – 2023. – № 1. (317). – С. 26–32. doi: 10.31891/2307-5732-2023-317-1-26-32
7. Awotunde, J. B., Bhoi, A. K., & Barsocchi, P. (2021). Hybrid cloud/fog environment for healthcare: An exploratory study, opportunities, challenges, and future prospects. *Hybrid Artificial Intelligence and IoT in Healthcare* (pp. 1-20). Singapore: Springer.
8. Awotunde, J. B., Jimoh, R. G., Oladipo, I. D., & Abdulraheem, M. (2021). Prediction of malaria fever using longshort-term memory and big data. *Communications in Computer and Information Science*, 1350, 41-53.

9. Васильківський, М., Прикмета, А., Олійник, А., & Нікітович, Д. (2023). Оптимізація інтелектуальних телекомунікаційних мереж. Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки. – 2023. – № 1. (317). – С. 33–41. doi: 10.31891/2307-5732-2023-317-1-33-41
10. Ayo, F. E., Ogundokun, R. O., Awotunde, J. B., Adebisi, M. O., & Adeniyi, A. E. (2020, July). Severe acne skin disease: A fuzzy-based method for diagnosis. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 12254 LNCS, pp. 320-334.
11. М. Васильківський, О. Болдирева, Г. Варгатюк, і М. Будащ, «Керування телекомунікаційними мережами з використанням технологій AI/ML», ВОТТП, вип. 1, с. 89–100, Бер 2023. doi: 10.31891/2219-9365-2023-73-1-13
12. М. Васильківський, О. Городецька, Б. Климчук, В. Говорун «Стратегії технологічного розвитку апаратного забезпечення інфокомунікаційних радіомереж», Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. ІТКІ, вип. 56, вип. 1, с. 83–91, Бер 2023. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-83-91>
13. Васильківський, М., Городецька, О., Стальченко, О., & Будащ, М. (2023). Інтегрована радіосистема сканування та зв'язку. Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки. – 2023. – № 2. (319). – С. 56–63. doi: 10.31891/2307-5732-2023-319-1-56-63
14. М. Васильківський, О. Болдирева, Г. Варгатюк, Н. Грабчак. «Коригування параметрів мобільних систем МІМО із використанням штучного інтелекту», КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО, 51 (Чер 2023), 139-147. doi: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-18>.
15. М. Васильківський, Д. Нікітович, О. Болдирева, Н. Якубівська. «Інтелектуальні технології коригування фізичного рівня мобільних мереж», КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА,

ВИРОБНИЦТВО, (51), 148-160. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-51-19>

16. М. Васильківський, Д. Нікітович, Н. Грабчак, і Н. Якубівська, «Оптимізація адаптивних радіосистем із використанням алгоритмів ШІ та МН», БОТТП, вип. 2, с. 112–124, Чер 2023. doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-15

17. Ning, Z., Dong, P., Wang, X., Hu, X., Guo, L., Hu, B., . . . Kwok, R. Y. (2020). Mobile edge computing enabled 5G health monitoring for Internet of medical things: A decentralized game-theoretic approach. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1-16.

18. Ogundokun, R. O., Sadiku, P. O., Misra, S., Ogundokun, O. E., Awotunde, J. B., & Jaglan, V. (2021). Diagnosis of long sightedness using neural network and decision tree algorithms. *Journal of Physics: Conference Series*, 1767(1), 012021.

19. Oladele, T. O., Ogundokun, R. O., Awotunde, J. B., Adebisi, M. O., & Adeniyi, J. K. (2020, July). Diagmal: A malaria coactive neuro-fuzzy expert system. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 12254 LNCS, pp. 428-441.

20. Oladipo, I. D., Babatunde, A. O., Awotunde, J. B., & Abdulraheem, M. (2021). An improved hybridization in the diagnosis of diabetes mellitus using selected computational intelligence. *Communications in Computer and Information Science*, 1350, 272-285.

21. Pustokhina, I. V., Pustokhin, D. A., Gupta, D., Khanna, A., Shankar, K., & Nguyen, G. N. (2020). An effective training scheme for a deep neural network in edge computing enabled Internet of medical things (IoMT) systems. *IEEE Access*, 8, 107112-107123.

22. Rahman, M. A., Hossain, M. S., Islam, M. S., Alrajeh, N. A., & Muhammad, G. (2020). Secure and prove-nance enhanced internet of health things framework: A blockchain managed federated learning approach. *IEEE Access*, 8, 205071-205087.

23. Rehman, H. U., Khan, A., & Habib, U. (2020). Fog computing for bioinformatics applications. *Fog Computing: Theory and Practice*, 529-546.

24. Saeed, N., Bader, A., Al-Naffouri, T. Y., & Alouini, M. S. (2020). When wireless communication faces COVID-19: Combating the pandemic and saving the economy. *arXiv preprint arXiv:2005.06637*.
25. Sundwall, D. N., Munger, M. A., Tak, C. R., Walsh, M., & Feehan, M. (2020). Lifetime prevalence and correlates of patient-perceived medical errors experienced in the US ambulatory setting: A population-based study. *Health Equity*, 4(1), 430-437.
26. Sust, P. P., Solans, O., Fajardo, J. C., Peralta, M. M., Rodenas, P., Gabalda, J., . . . Monfa, R. R. (2020). Turning the crisis into an opportunity: Digital health strategies deployed during the COVID-19 outbreak. *JMIR Public Health and Surveillance*, 6(2), e19106.
27. Tripathi, G., Ahad, M. A., & Paiva, S. (2020). S2HS-A blockchain-based approach for the smart healthcare system. *Healthcare* (8, No. 1, p. 100391). Elsevier.
28. Tuli, S., Basumatary, N., Gill, S. S., Kahani, M., Arya, R. C., Wander, G. S., & Buyya, R. (2020). Healthfog: An ensemble deep learning-based smart healthcare system for automatic diagnosis of heart diseases in integrated IoT and fog computing environments. *Future Generation Computer Systems*, 104, 187-200.
29. Vizitiu, A., Niță, C. I., Puiu, A., Suciu, C., & Itu, L. M. (2020). Applying deep neural networks over homomorphic encrypted medical data. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2020.
30. Wen, F., He, T., Liu, H., Chen, H. Y., Zhang, T., & Lee, C. (2020). Advances in chemical sensing technology for enabling the next-generation self-sustainable integrated wearable system in the IoT era. *Nano Energy*, 105155.
31. Zafar, S., Khan, S., Iftikhar, N., & Biswas, S. (2020). Consociate healthcare system through biometric based internet of medical things (BBIOMT) approach. *EAI Endorsed Transactions on Smart Cities*, 4(10).
32. Gupta, D., & Khamparia, A. (Eds.). (2020). *Fog, Edge, and Pervasive Computing in Intelligent IoT Driven Applications*. John Wiley & Sons.

33. Hameed, K., Bajwa, I. S., Sarwar, N., Anwar, W., Mushtaq, Z., & Rashid, T. (2021). Integration of 5G and Block-Chain Technologies in Smart Telemedicine Using IoT. *Journal of Healthcare Engineering*, 2021.
34. Jurcut, A. D., Ranaweera, P., & Xu, L. (2020). Introduction to IoT security. *IoT security: Advances in authentication*, 27-64.
35. Khan, L. U., Yaqoob, I., Tran, N. H., Kazmi, S. A., Dang, T. N., & Hong, C. S. (2020). Edge-computing-enabled smart cities: A comprehensive survey. *IEEE Internet of Things. Journal*, 7(10), 10200-10232.
36. Singh, P., & Agrawal, R. (2021). An Overloading State Computation and Load Sharing Mechanism in Fog Computing. *Journal of Information Technology Research (JITR)*, 14(4), 94-106.
37. Singh, P., & Singh, N. (2020). Blockchain With IoT and AI: A Review of Agriculture and Healthcare. *International Journal of Applied Evolutionary Computation (IJAEC)*, 11(4), 13-27.
38. Singh, P., Singh, N., Singh, K. K., & Singh, A. (2021). Diagnosing of disease using machine learning. In. *Machine Learning and the Internet of Medical Things in Healthcare* (pp. 89-111). Academic Press.
39. Suresh, A., & Paiva, S. (Eds.) (2021). *Deep learning and edge computing solutions for high performance computing*. Springer International Publishing.
40. Torre, R., Doan, T., & Salah, H. (2020). Mobile edge cloud. In. *Computing in Communication Networks* (pp. 77-91). Academic Press.
41. Zhang, Y., Chen, G., Du, H., Yuan, X., Kadoch, M., & Cheriet, M. (2020). Real-time remote health monitoring system driven by 5G MEC-IoT. *Electronics*, 9(11), 1753.
42. Bai, T., Pan, C., Deng, Y., Elakashlan, M., Nallanathan, A., & Hanzo, L. (2020). Latency minimization for intelligent reflecting surface aided mobile edge computing. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38(11), 2666-2682.
43. Braeken, A., & Liyanage, M. (2020). Highly efficient key agreement for remote patient monitoring in MEC-enabled 5G networks. *The Journal of Supercomputing*, 1-24.

44. Chih-Lin, I., Kuklinski, S., Chen, T. C., & Ladid, L. L. (2020). A perspective of O-RAN integration with MEC, SON, and network slicing in the 5G era. *IEEE Network*, 34(6), 3-4.
45. Dong, P., Ning, Z., Obaidat, M. S., Jiang, X., Guo, Y., Hu, X., . . . Sadoun, B. (2020). Edge computing based healthcare systems: Enabling decentralized health monitoring in Internet of medical Things. *IEEE Network*, 34(5), 254-261.
46. Gu'r, G., Porambage, P., & Liyanage, M. (2020). Convergence of ICN and MEC for 5G: Opportunities and Challenges. *IEEE Communications Standards Magazine*, 4(4), 64-71.
47. Hewa, T., Braeken, A., Ylianttila, M., & Liyanage, M. (2020). Multi-access edge computing and blockchain-based secure telehealth system connected with 5G and IoT. In: *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Communications and Networking (IEEE ComNet')*.
48. Ksentini, A., & Frangoudis, P. A. (2020). Toward slicing-enabled multi-access edge computing in 5g. *IEEE Network*, 34(2), 99-105.
49. Liu, Y., Peng, M., Shou, G., Chen, Y., & Chen, S. (2020). Toward edge intelligence: Multiaccess edge computing for 5G and internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(8), 6722-6747.
50. Ning, Z., Dong, P., Wang, X., Hu, X., Guo, L., Hu, B., . . . Kwok, R. Y. (2020). Mobile edge computing enabled 5G health monitoring for Internet of medical things: A decentralized game theoretic approach. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1-6.
51. Pham, Q. V., Fang, F., Ha, V. N., Piran, M. J., Le, M., Le, L. B., . . . Ding, Z. (2020). A survey of multi-access edge computing in 5G and beyond: Fundamentals, technology integration, and state-of-the-art. *IEEE Access*, 8, 116974-117017.
52. Tomaszewski, L., Kuklin'ski, S., & Kołakowski, R. (2020). A new approach to 5G and MEC integration. In: *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations*, Jun 5, pp. 15-24.

53. Yu, W., & Choi, J. (2020). Human identification in health care systems using mobile edge computing. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 31(12), e4031.
54. Zhang, Y., Di, B., Wang, P., Lin, J., & Song, L. (2020). HetMEC: Heterogeneous multi-layer mobile edge computing in the 6 G era. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(4), 4388-4400.
55. Zhang, Y., Chen, G., Du, H., Yuan, X., Kadoch, M., & Cheriet, M. (2020). Real-time remote health monitoring system driven by 5G MEC-IoT. *Electronics*, 9(11), 1753.
56. Jeyakumar, V., Nirmala, K., & Sarate, G. S. (2022). Non-contact measurement system for COVID-19 vital signs to aid mass screening—An alternate approach. In Ramesh Chandra Poonia, et al. (Eds.), *Cyber-Physical Systems: AI and COVID-19* (pp. 75-92). Academic Press.
57. Kurian, P., & Jeyakumar, V. (2020). Multimodality medical image retrieval using convolutional neural network. In *Deep Learning Techniques for Biomedical and Health Informatics*, (pp. 53-95). Academic Press.
58. Rajesh, S., Paul, V., Menon, V. G., Jacob, S., & Vinod, P. (2020). Secure brain-to-brain communication with edge computing for assisting post-stroke paralyzed patients. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(4), 2531-2538. Available from <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2951405>.
59. Rashid, M., Sulaiman, N., Abdul Majeed, A. P. P., Mosa, R. M., Nasir, A. F. A., Bari, B. S., & Khatun, S. (2020). Current status, challenges, and possible solutions of EEG-based brain-computer interface: A comprehensive review. *Frontiers in Neurorobotics*, 14. Available from <https://doi.org/10.3389/fnbot.2020.00025>.
60. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТУ МЕДИЧНИХ
РЕЧЕЙ. ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРИФЕРІЙНИХ ОБЧИСЛЕНЬ В СИСТЕМАХ ІОМТ
назва магістерської кваліфікаційної роботи

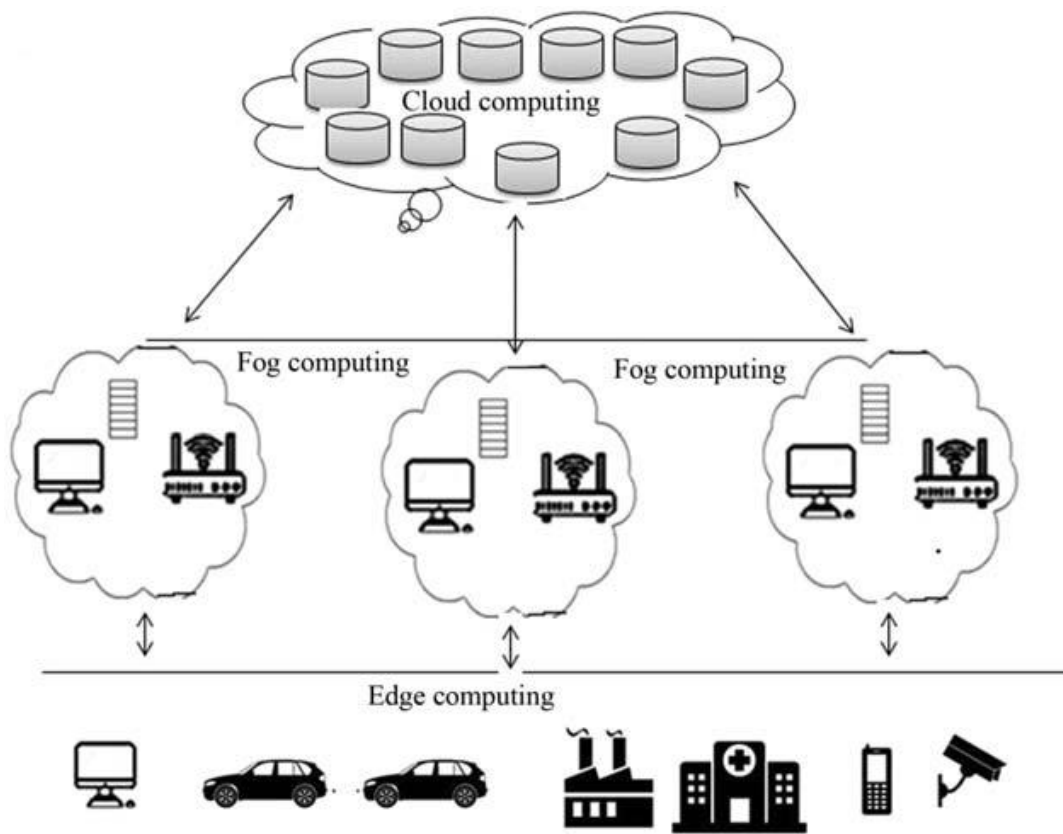


Рисунок 1 – Архітектура промислового Інтернету речей з хмарними, туманними та периферійними обчисленнями

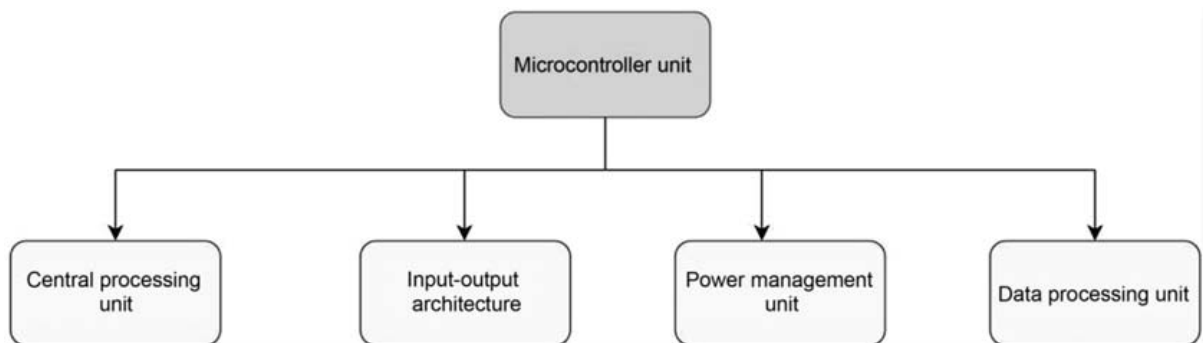


Рисунок 2 – Загальна архітектура системи IoT

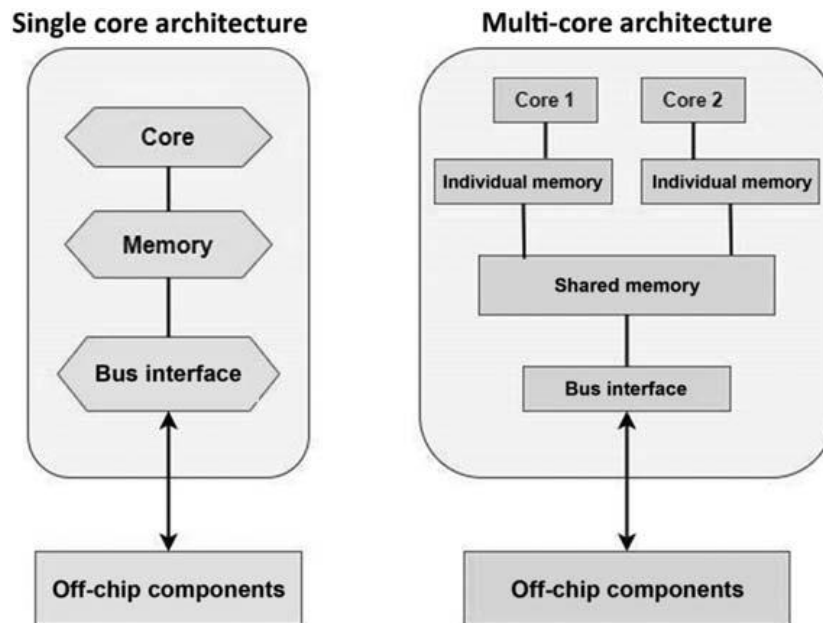


Рисунок 3 – Одноядерна та багатоядерна архітектури процесорного блоку системи IoT

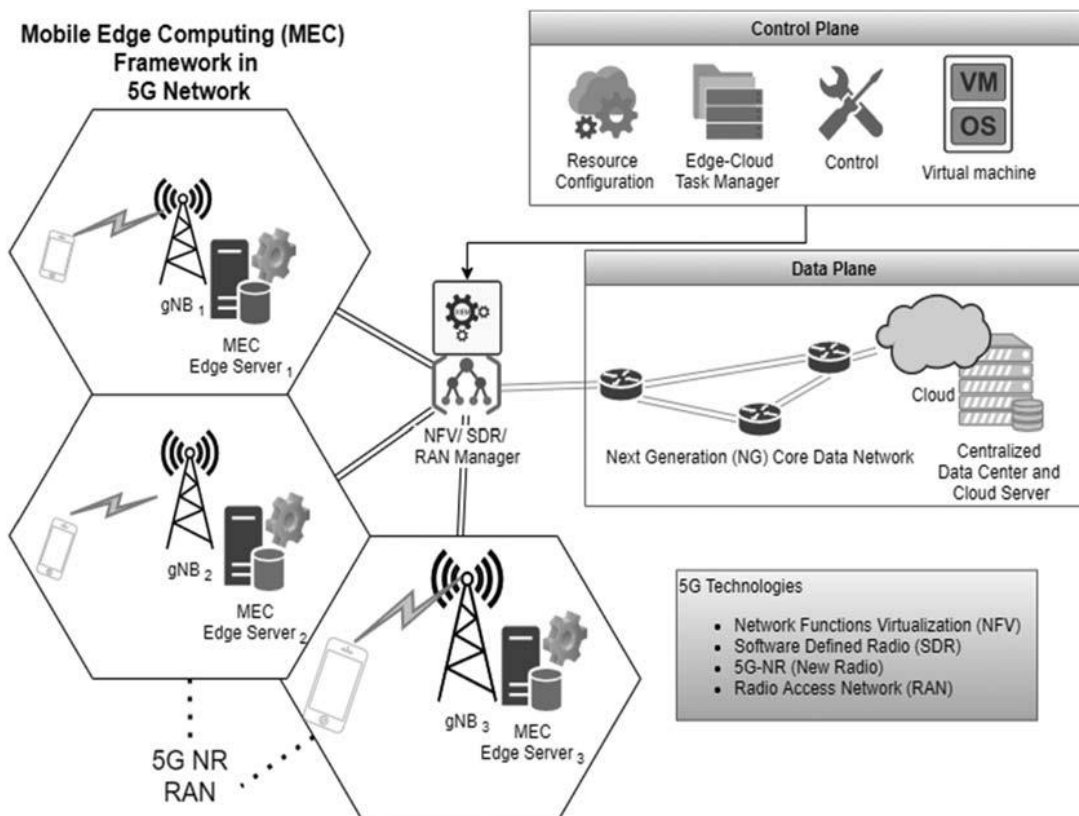


Рисунок 4 – Структура периферійних обчислень з багаторазовим доступом в мережі 5G

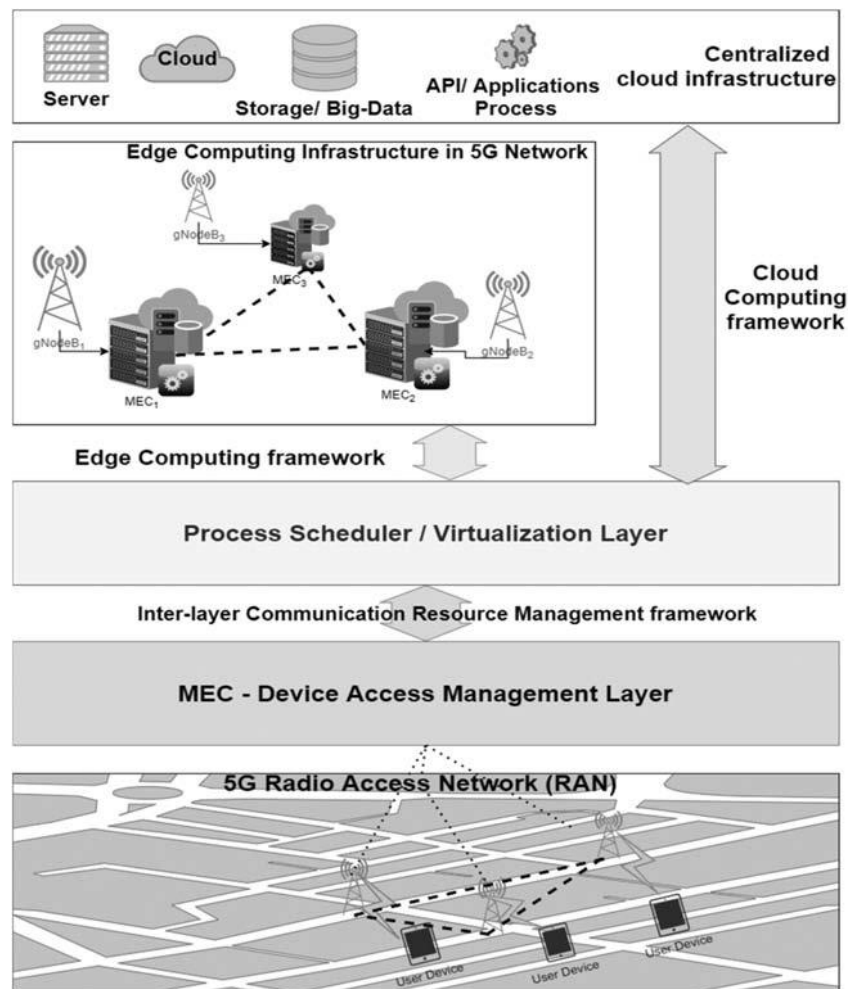


Рисунок 5 – Багаторівнева сервіс-орієнтована архітектура для 5G MEC

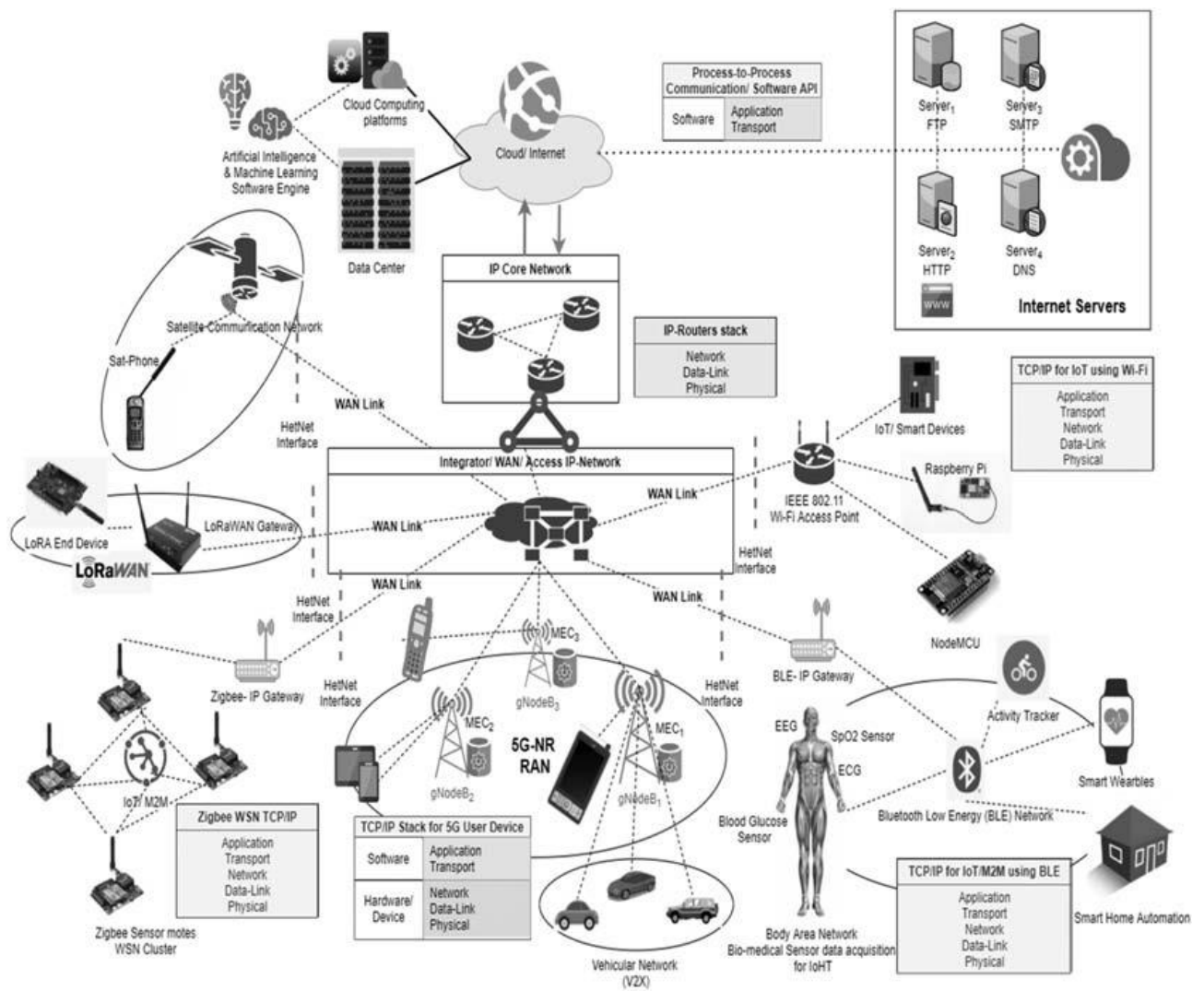


Рисунок 6 – Конвергентна мережева архітектура 5G і MEC

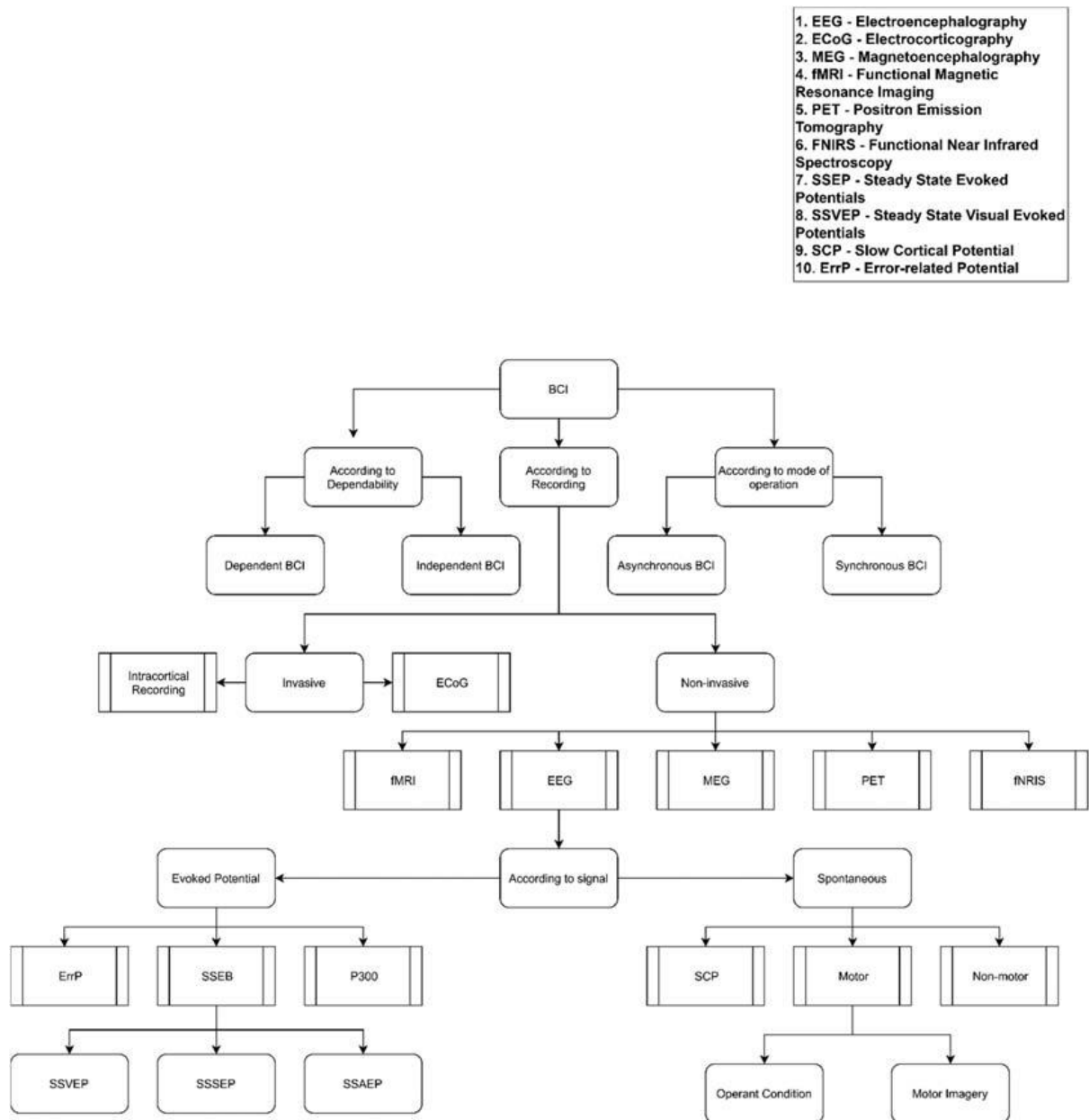


Рисунок 7 – Класифікація систем ВСІ

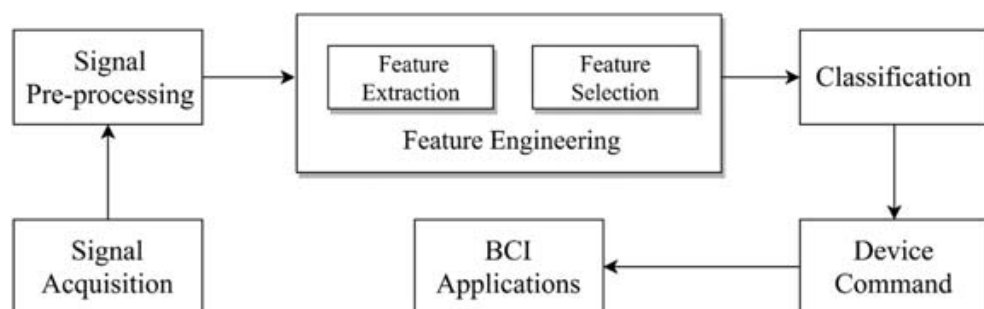


Рисунок 8 – Загальна архітектура інтерфейсу «мозок-комп'ютер»

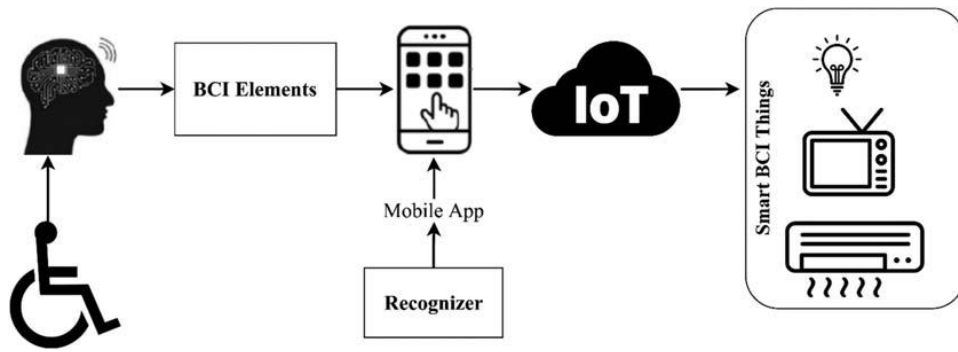


Рисунок 9 – Архітектура системи IoMT

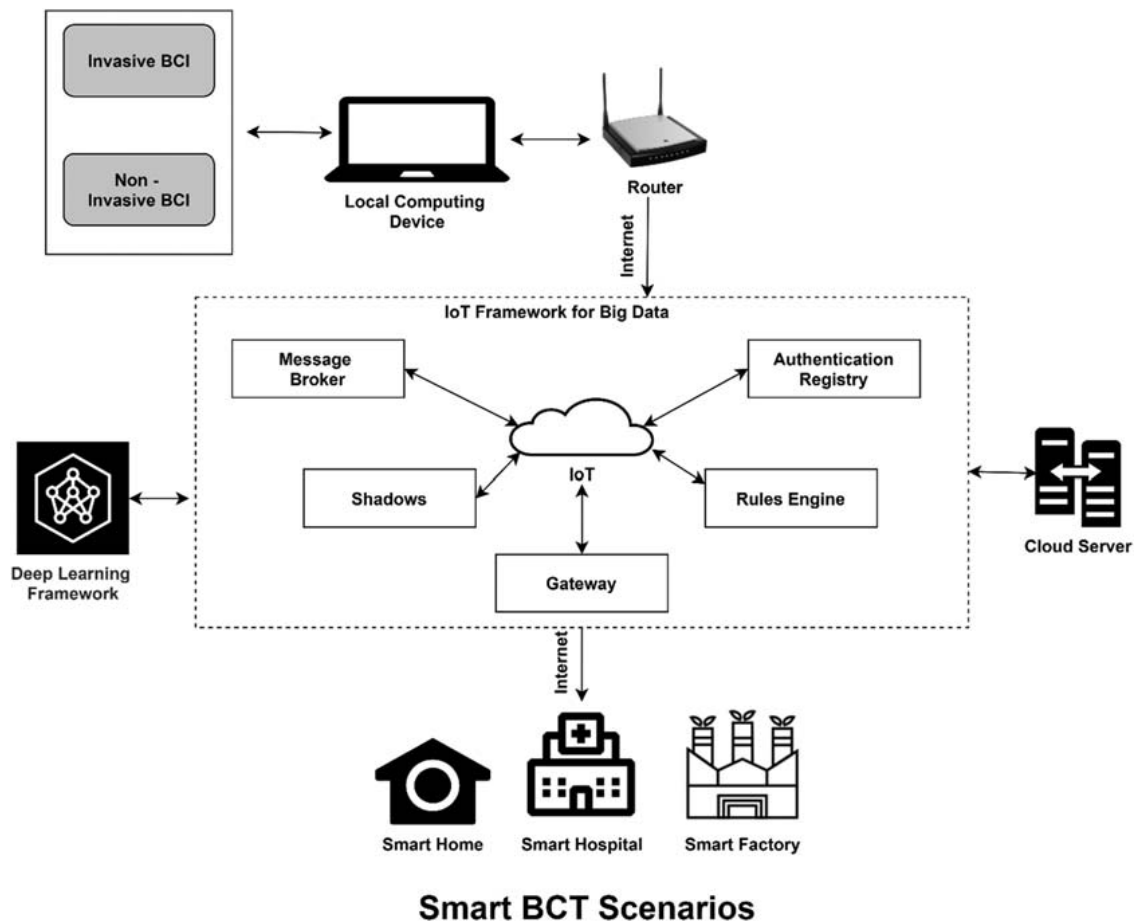


Рисунок 10 – Архітектура системи IoT з глибоким навчанням

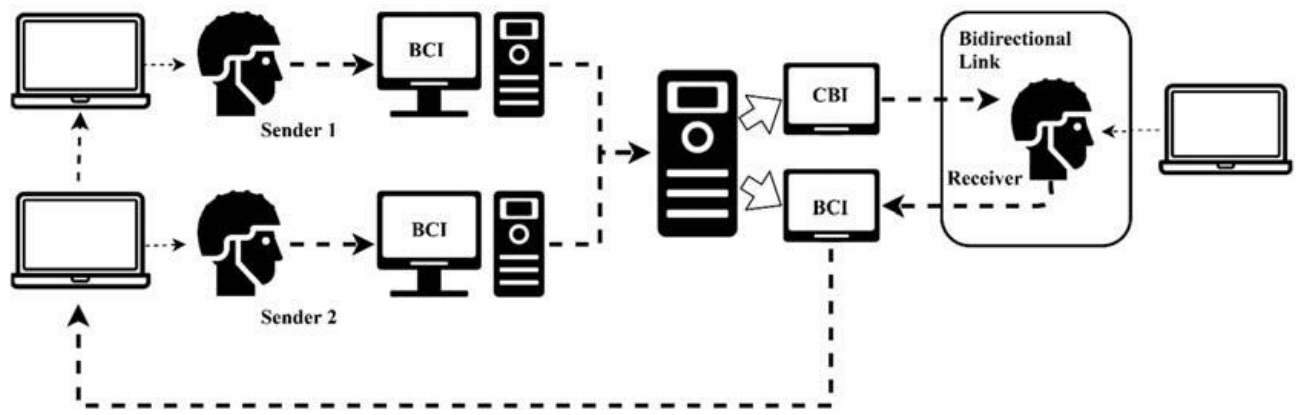


Рисунок 11 – Структура сегменту мережі IoMT

Додаток Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Інтелектуальні системи та мережі інтернету медичних речей.
Технології периферійних обчислень в системах ІоМТ

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС

Керівник Васильківський М.В., к.т.н., доцент

Показники звіту подібності

Turnitin	
Оригінальність	98 %
Загальна схожість	2 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи (додається)

Автор

dm
(підпис)

Бойко А. В.

(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

—

Особа, відповідальна за перевірку

М.В.
(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

Експерт

(за потреби) (підпис)

(прізвище, ініціали, посада)