

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий Інститут телекомунікаційних систем**

**Кафедра електронних комунікацій та Інтернету речей**

До захисту допущено:

ВО завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Вячеслав НОСКОВ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025р.

## **Дипломна робота**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою**

**«Системи електронних комунікацій та Інтернету речей»**

**спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка**

**на тему: «Аналіз методів підвищення енергоефективності в мережах  
5G»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТС-12

Колесник Ярослав Вікторович \_\_\_\_\_

Керівник:

Доц.кафедри ЕКІР, к.т.н., доц

Григоренко Олена Григорівна \_\_\_\_\_

Рецензент:

Професор кафедри ТК НН ІТС, д.т.н, проф,

Репа Федір Михайлович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2025

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем  
Кафедра електронних комунікацій та Інтернету речей**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітньо-професійна програма «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей»

ЗАТВЕРДЖУЮ

ВО завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Вячеслав НОСКОВ  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**

на дипломну роботу студенту

Колеснику Ярославу Вікторовичу

1. Тема роботи «Аналіз методів підвищення енергоефективності в мережах 5G», керівник роботи Олена Григорівна Григоренко, кандидат технічних наук, затверджені наказом по університету від 26 травня 2025 р. №1755 – с.

2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2025.

3. Зміст роботи

Розгляд методів підвищення енергоефективності мережі 5G

Аналіз технологічних рішень та інноваційних методів

Розробка стратегій та рекомендацій з підвищення енергоефективності

4. Перелік ілюстративного матеріалу:

- 1) Тема, актуальність, мета та задачі дипломної роботи
- 2) Теоретичні основи підвищення енергоефективності в мережах мобільного зв'язку 5G
- 3) Огляд рішень та технологій для енергоефективності у 5G акцент на відновлювані джерела енергії
- 4) Оцінка енергоефективності використання сонячної енергетики в мережах 5G
- 5) Список публікацій за темою дипломної роботи

6) Загальні висновки по роботі;

5. Дата видачі завдання

07.11.2024

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Отримання завдання	07.11.2024	виконано
2.	Збір інформації	05.03.2025	виконано
3.	Аналіз ключових принципів енергоефективності та їх роль у функціонуванні мереж п'ятого покоління (5G)	15.03.2025	виконано
4.	Порівняльне дослідження технологій, спрямованих на зниження енергоспоживання в телекомунікаційних системах п'ятого покоління	25.03.2025	виконано
5.	Застосування алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для підвищення енергоефективності в інфраструктурі мереж 5G	01.04.2025	виконано
6.	Дослідження потенціалу впровадження відновлюваних джерел енергії в сучасних енергетичних системах	15.05.2025	виконано
7.	Комплексні підходи та практичні рекомендації щодо підвищення енергоефективності телекомунікаційних мереж п'ятого покоління	21.05.2025	виконано
8.	Рекомендації щодо раціонального використання енергоресурсів у мережах 5G для забезпечення їх стабільної та ефективною роботи	25.05.2025	виконано

Студент

Керівник

Ярослав Колесник

Олена Григоренко

## РЕФЕРАТ

Структура роботи – Дипломна робота включає реферат, зміст, перелік скорочень, вступ, три основні розділи з висновками до кожного з них, загальний висновок та список використаних джерел. Робота містить 79 сторінок, 14 ілюстрацій, 8 таблиць і базується на аналізі 43 джерел інформації.

Актуальність роботи - З розвитком телекомунікаційних технологій та збільшенням обсягів передавання даних зростає необхідність у підвищенні енергоефективності мереж нового покоління, зокрема 5G. Зниження енергоспоживання при одночасному підвищенні швидкості та продуктивності передачі даних є важливим аспектом для сталого розвитку телекомунікаційних систем. Оптимізація енергоспоживання в мережах 5G сприяє зменшенню екологічного впливу технологій та забезпечує їхню ефективну експлуатацію.

Мета роботи – Дослідження зосереджується на всебічному аналізі сучасних підходів і стратегій, спрямованих на підвищення енергоефективності в телекомунікаційних мережах п'ятого покоління (5G). Особлива увага приділяється вивченню існуючих механізмів зниження енергоспоживання, оцінці актуальних технологічних рішень, а також впровадженню інновацій, зокрема систем на основі штучного інтелекту, алгоритмів машинного навчання та відновлюваних джерел енергії. Основною метою цього дослідження є формулювання практичних рекомендацій, що дозволять оптимізувати використання енергоресурсів, забезпечуючи стабільну та ефективну роботу інфраструктури 5G.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси забезпечення зв'язку в мережах 5G.

Предмет дослідження – підходи, методи та технологічні рішення для підвищення енергоефективності в мережах 5G та їх аналіз.

Методи дослідження – використання комплексного підходу, що включає теоретичний аналіз наукової літератури, систематичний огляд сучасних технологій, а також емпіричний аналіз даних.

Отримані результати – визначено ключові фактори, що впливають на енергоспоживання в мережах п'ятого покоління; наголошено на важливості застосування енергоефективних мережевих архітектур і протоколів зв'язку; встановлено, що комплексне впровадження сучасних методів і стратегій може значно покращити енергоефективність мереж 5G.

Ключові слова: 5G; підвищення енергоефективності; бездротові мережі; методи оптимізації енергоспоживання; енергоефективні технології.

## ABSTRACT

Structure of the work – This thesis includes an abstract, a table of contents, a list of abbreviations, an introduction, three core chapters each followed by a conclusion, a general conclusion, and a bibliography. The document comprises 79 pages, featuring 14 figures and 8 tables. A total of 43 sources were referenced.

Relevance of the research – As telecommunications technologies advance and data transmission volumes grow, enhancing energy efficiency in next-generation networks, especially 5G, has become a crucial challenge. Reducing energy consumption while boosting performance and transmission speeds is vital for the sustainable progress of modern telecommunication systems. Optimizing energy use in 5G networks not only helps minimize the environmental impact of technology but also ensures more efficient operation.

Purpose of the work – The goal of the research is to examine and explore contemporary methods and strategies for enhancing energy efficiency in 5G networks. The study concentrates on reviewing current approaches to reducing energy consumption, assessing the technological solutions used in modern 5G networks, and incorporating innovative techniques like artificial intelligence, machine learning, and alternative energy sources. The main aim is to formulate recommendations for optimizing energy use, ensuring the stable and efficient performance of 5G networks.

Object of research – technological processes involved in providing communication in 5G networks.

Subject of research – approaches, methods, and technological solutions for enhancing energy efficiency in 5G networks and their analysis.

Research methods – A thorough approach, incorporating a theoretical analysis of scientific literature, a systematic review of contemporary technologies, and an analysis of empirical data.

Results – Several crucial factors impacting energy consumption in fifth-generation communication networks have been identified. The significance of adopting energy-efficient network architectures and communication protocols has been

highlighted. It has been established that the combined use of modern methods and strategies can substantially improve energy efficiency in 5G networks.

Keywords: 5G; energy efficiency improvement; wireless networks; energy-saving methods; energy-efficient technologies.

## Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .	9
ВСТУП.....	11
1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЇХ РОЛІ В РОЗВИТКУ МЕРЕЖ 5G.....	13
1.1 Аналіз принципів енергоефективності та їх ролі в розвитку мереж 5G .....	13
1.2 Основи екологічних технологій у 5G - мережах .....	16
1.3 Глобальні стандарти та регуляції щодо енергоефективності в мережах 5G.	19
1.4 Типові випадки застосування мереж 5G.....	21
1.5 Оцінка та порівняння технологічних підходів до зниження енергоспоживання в 5G мережах.....	26
1.6 Висновки до розділу 1.....	40
2 ПЕРЕДОВІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В МЕРЕЖАХ 5G .....	42
2.1 Застосування технологій штучного інтелекту та методів машинного навчання для підвищення ефективності енергоспоживання в мережах 5G .....	42
2.2 Оцінка потенціалу застосування відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної енергетики, для забезпечення енергоживлення інфраструктури мереж 5G .....	52
2.3 Висновки до розділу 2.....	58
3 ПІДХОДИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ 5G - МЕРЕЖАХ .....	59
3.1 Особливості оптимізації енергоефективності в 5G – мережах.....	59
3.2 Рекомендації з енергоефективності для мереж 5G .....	65
3.3 Висновки до розділу 3.....	68
ВИСНОВКИ.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	72

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

IoT	Internet of Things – Інтернет речей;
5G	fifth generation – п'яте покоління мобільних телекомунікаційних технологій
ICUE	Інтелектуальні системи управління енергією
LPWAN	англ. Low Power Wide Area Network, укр. тип бездротової мережі зв'язку, який призначений для забезпечення далекого зв'язку з пристроями
EMS	англ. Energy Management System – система управління енергетикою
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communications – надзвичайно надійний зв'язок з низькою затримкою
VR	Virtual Reality – віртуальна реальність;
AR	Augmented Reality – розширена реальність;
mmWave	millimeter wave – інтерфейс програмування додатків;
ДМП	динамічне управління потужністю;
SNR	Signal-to-Noise Ratio – відношення сигнал/шум;
MIMO	Multiple Input, Multiple Output – технологія бездротового зв'язку, яка використовує багатоканальність;
NFV	Network Functions Virtualization – віртуалізація мережових функцій;
LDPC	Low-Density Parity-Check – контроль з низькою щільністю перевірки парності;
ШІ	штучний інтелект;
LZMA	Lempel-Ziv-Markov chain Algorithm – алгоритм Лемпеля-Зіва-ланцюгів Маркова;
Zstd	Zstandard – алгоритм стискання даних;
MFA	Multi-Factor Authentication – багатофакторна аутентифікація;
ETSI	European Telecommunications Standards Institute – Європейський інститут стандартів телекомунікацій;

- IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers – Інститут інженерів електротехніки та електроніки
- ITU International Telecommunication Union – Міжнародний телекомунікаційний союз;
- 3GPP 3rd Generation Partnership Project – Проект партнерства третього покоління;

## ВСТУП

Розвиток технологій зв'язку та постійне зростання обсягів переданої інформації висувають важливе завдання — підвищення енергоефективності в мережах нового покоління, таких як 5G. Скорочення енергоспоживання при одночасному збільшенні продуктивності та швидкості передачі даних стає одним із ключових факторів удосконалення сучасних телекомунікаційних систем. Висока енергоефективність у мережах 5G відіграє важливу роль у зниженні екологічного впливу цифрових технологій та сприяє їхньому сталому розвитку. Це, своєю чергою, вимагає застосування інноваційних методів і технологій оптимізації енергоспоживання.

Щороку обсяг переданої інформації в телекомунікаційних мережах суттєво збільшується, що зумовлює зростаючі вимоги до їхньої пропускної здатності та енергетичної ефективності. Особливо це питання набуває актуальності у зв'язку із впровадженням мереж 5G, які покликані забезпечити високошвидкісний обмін даними, мінімальну затримку сигналу та масштабну інтеграцію інтернету речей (IoT). Для реалізації цих можливостей необхідно вдосконалювати існуючі технологічні рішення та розробляти нові підходи до скорочення енергоспоживання мережевих елементів без втрати якості обслуговування.

Одним із найбільших викликів для розробників телекомунікаційних систем є зменшення рівня споживання енергії базовими станціями, які є найбільшими споживачами електроенергії в 5G-мережах. Використання новітніх технологій оптимізації, зокрема енергоефективних алгоритмів управління трафіком, інтелектуальних систем керування енергоспоживанням та когнітивного радіо, сприяє значному зниженню витрат енергії. Крім того, розробка новітніх матеріалів та компонентів із меншою енергоємністю є ще одним важливим напрямом підвищення енергоефективності мереж.

Не менш значущою є проблема оптимізації енергоспоживання кінцевими користувачами. Сучасні мобільні пристрої, такі як смартфони, планшети та інші гаджети, споживають значну кількість енергії, що потребує впровадження нових

технологій енергозбереження. До таких належать удосконалені акумуляторні батареї, енергоефективні дисплеї та процесори з мінімізованим споживанням електроенергії. Крім того, застосування інтелектуальних алгоритмів керування енергоспоживанням, які дозволяють оптимально розподіляти ресурси залежно від рівня навантаження, є ключовим фактором для забезпечення тривалої автономної роботи мобільних пристроїв.

Теоретичною основою цього дослідження стали роботи таких авторів, як Шумков І.М., Квятковський Д.В., Хоменко М.І., Остапчук В.В., Mondal B., Abdelkafi N., Bolla R., Lanting C.J., Rodriguez-Ascaso A., Thuns M., Wetterwald M. та інших.[2-5, 21] У своїх дослідженнях вони аналізували різні аспекти впровадження технологій енергоефективності в мережах 5G. Зокрема, їхні роботи охоплювали широкий спектр підходів до оптимізації енергоспоживання, включаючи алгоритми розподілу ресурсів, динамічні системи управління живленням та методи інтелектуального аналізу даних. Досвід цих науковців став важливою базою для подальшого розвитку інноваційних рішень у сфері енергоефективності телекомунікаційних мереж.

**Мета дослідження** - використання комплексного підходу, що включає теоретичний аналіз наукової літератури, систематичний огляд сучасних технологій, а також емпіричний аналіз даних мережі.

**Об'єкт дослідження** – процес організації та підтримки зв'язку в мережах 5G.

**Предмет досліджень** – сучасні технологічні рішення, методи та підходи, спрямовані на підвищення енергоефективності мереж 5G, а також їхній детальний аналіз.

**Методи дослідження.** Дослідження базується на застосуванні комплексного підходу, що включає теоретичний аналіз наукових праць, систематичний огляд сучасних технологічних рішень, а також емпіричний аналіз даних, що дозволяє оцінити ефективність різних методів і технологій.

# 1 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЇХ РОЛІ В РОЗВИТКУ МЕРЕЖ 5G

## 1.1 Аналіз принципів енергоефективності та їх ролі в розвитку мереж 5G

Забезпечення енергоефективності в мережах п'ятого покоління відіграє ключову роль у досягненні цілей сталого розвитку та підвищенні економічної ефективності сучасної телекомунікаційної інфраструктури. Цей чинник суттєво впливає на широкий спектр параметрів, включно з експлуатаційними витратами, екологічною безпекою та здатністю мережі ефективно обробляти та передавати великі обсяги даних.

Один із ключових аспектів підвищення енергоефективності мереж п'ятого покоління полягає в оптимізації експлуатаційних витрат. Зниження рівня енергоспоживання безпосередньо впливає на зменшення фінансових витрат, пов'язаних з енергопостачанням і технічною підтримкою функціонування інфраструктури. Досягнення таких результатів можливе завдяки модернізації архітектури мережі, інтеграції енергоощадних технологічних рішень і переходу до більш ефективних режимів експлуатації [26].

Охорона навколишнього середовища є невід'ємною складовою концепції енергоефективності мереж п'ятого покоління. Зменшення енергоспоживання безпосередньо впливає на зниження рівня шкідливих викидів у повітря, а також сприяє більш ощадливому використанню природних ресурсів. Такий підхід відповідає стратегічним орієнтирам сталого розвитку на глобальному рівні та дозволяє знизити екологічний тиск, спричинений функціонуванням телекомунікаційної інфраструктури.

Пропускна здатність телекомунікаційної мережі має тісний зв'язок із рівнем її енергетичної ефективності. Рациональне використання енергетичних ресурсів сприяє оптимізації показників пропуску трафіку, забезпечуючи надійне та високоякісне обслуговування кінцевих користувачів. Досягти такого результату дозволяє модернізація мережевої інфраструктури, впровадження інноваційних технологій обробки та передачі інформації, а також запровадження досконалих систем керування ресурсами.

Аналіз енергоефективності мереж п'ятого покоління базується на ключових поняттях та кількісних індикаторах. Одним з головних є загальний обсяг споживаної енергії, що відображає сумарне використання енергоресурсів мережею за визначений часовий інтервал. Важливим також є показник енерговитрат на одиницю інформаційного трафіку — він зазвичай виражається в джоулях або ватах на одиницю переданих даних, і дає змогу оцінити ефективність енергоспоживання під час процесу передачі. Енергоефективність у розрахунку на одного користувача демонструє співвідношення загальної витрати енергії до кількості абонентів, що є критичним чинником у контексті раціонального використання ресурсів. Показники продуктивності мережі — такі як ширина пропускнуго каналу, рівень затримок та надійність з'єднання — виступають критеріями якості обслуговування та ефективного функціонування мережевої інфраструктури [4].

На рівень енергоефективності мереж п'ятого покоління впливають різноманітні чинники, серед яких можна виокремити кілька найсуттєвіших. Насамперед, це технології радіодоступу, зокрема mmWave, Sub-6 GHz і Massive MIMO, що формують підхід до передачі даних та визначають ефективність використання частотного спектру. Не менш важливу роль відіграє мережна архітектура, яка охоплює кількість базових станцій, їхнє географічне розташування, топологічну структуру системи та режими її функціонування — усе це безпосередньо впливає на рівень загального енергоспоживання. Також значення має ступінь мережевого навантаження, який визначається обсягом переданого трафіку та характером сервісів, що надаються.



Рисунок 1.1 - Основні чинники, що визначають енергоефективність мереж п'ятого покоління (5G) [2]

Окрім того, впровадження адаптивних режимів роботи, таких як активний, перехідний та енергозберігаючий (сплячий), дозволяє гнучко керувати споживанням енергії відповідно до змін у мережевому середовищі та потреб абонентів.

Інтенсивне розгортання мереж п'ятого покоління в останні роки зумовило істотне зростання пропускну здатності та швидкості передавання даних, що водночас актуалізує питання ефективного використання енергії. У контексті прогнозованого стрімкого збільшення обсягів трафіку в мережах 5G, проблема енергоспоживання набуває ще більшої гостроти. Це обумовлює необхідність комплексного підходу до аналізу енергоефективності, з урахуванням не лише технічних, але й економічних та екологічних чинників, які формують сучасні вимоги до стійкості та раціонального функціонування телекомунікаційної інфраструктури.

У першу чергу доцільно розглянути екологічні наслідки підвищеного енергоспоживання, характерного для функціонування мереж 5G. Одним із найпомітніших ефектів є зростання обсягів викидів парникових газів, що сприяє глобальному потеплінню. До цього додається негативний вплив, пов'язаний із процесами видобутку та обробки природних ресурсів, необхідних для виробництва енергії, що поглиблює проблему забруднення навколишнього середовища. Крім того, значне навантаження на енергетичні системи може спричинити локальний дефіцит ресурсів, що ставить під загрозу стабільність регіональних екосистем.

З економічної перспективи нераціональне споживання енергії в телекомунікаційних мережах спричиняє низку негативних наслідків. Зокрема, збільшення експлуатаційних витрат для операторів зв'язку призводить до неминучого зростання тарифів для кінцевих споживачів. Така тенденція може вплинути на рівень конкурентоспроможності компаній на ринку, зменшуючи їхню привабливість для користувачів. У зв'язку з цим енергоефективність постає як ключовий елемент, необхідний для довгострокового розвитку галузі зв'язку та збереження її економічної життєздатності.

З технічної точки зору, надмірне споживання енергії в телекомунікаційних мережах може мати безпосередній вплив на функціонування обладнання. Зокрема, підвищене тепловиділення здатне спричинити перегрів систем, що часто призводить до збоїв у роботі або виходу з ладу окремих компонентів. Це, у свою чергу, обумовлює зростання витрат на технічне обслуговування та ремонт. До того ж, низький рівень енергоефективності негативно позначається на тривалості експлуатації мережевого устаткування, скорочуючи його ресурс [22].

Однією з ключових переваг впровадження енергоефективних рішень у мережах 5G є можливість суттєвого зменшення операційних витрат. Це дозволяє операторам оптимізувати фінансові ресурси та зберігати високу конкурентоспроможність у динамічному ринковому середовищі. Окрім економічного ефекту, важливе значення мають і соціально-екологічні аспекти — зниження рівня викидів парникових газів та збереження навколишнього середовища. Усе це сприяє формуванню основ сталого розвитку, орієнтованого на екологічну відповідальність і довгострокову ефективність.

Енергоефективність мереж п'ятого покоління (5G) відіграє ключову роль з огляду на екологічні, економічні та технічні аспекти. Досягнення сталого розвитку у сфері телекомунікацій можливе лише за умови безперервного вдосконалення методів зниження споживання енергії та впровадження новітніх технологічних рішень, які оптимізують енергетичні витрати. Такий комплексний підхід є необхідним для забезпечення балансу між високими вимогами до продуктивності мережі та відповідальним використанням природних і фінансових ресурсів.

## 1.2 Основи екологічних технологій у 5G - мережах

Концепції зелених технологій у 5G-мережах відіграють ключову роль у зниженні екологічного впливу інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) та сприяють формуванню більш сталих і енергоощадних систем. Серед головних принципів таких технологій виділяють підвищену енергоефективність,

застосування відновлюваних джерел енергії, впровадження ідей циркулярної економіки, розвиток розумних мереж і використання технологій для обробки "зелених" даних.

Питання енергоефективності в мережах п'ятого покоління (5G) набуває особливої актуальності в контексті зменшення споживання енергії телекомунікаційним обладнанням та загальною інфраструктурою. Досягнення цієї мети можливе завдяки застосуванню сучасних технічних рішень, зокрема впровадженню енергоощадних компонентів, використанню віртуалізації мережевих функцій (NFV), гнучкому масштабуванню мережі залежно від навантаження, а також удосконаленню комунікаційних протоколів. Зокрема, технологія NFV дозволяє перенести функціональність традиційного апаратного забезпечення у програмне середовище, що, у свою чергу, сприяє скороченню кількості фізичних пристроїв і, відповідно, зменшенню енергоспоживання [18].

Інтеграція відновлюваних джерел енергії в інфраструктуру мереж 5G виступає важливою складовою реалізації концепції «зелених» технологій. Зокрема, застосування енергії сонця та вітру для забезпечення живлення телекомунікаційного обладнання дає змогу істотно зменшити залежність від традиційних джерел енергії, зокрема викопного палива. Такий підхід не лише підвищує загальну енергонезалежність системи, а й сприяє зниженню обсягів викидів парникових газів, що позитивно впливає на екологічну ситуацію

У межах розвитку мереж 5G принципи циркулярної економіки передбачають створення телекомунікаційного обладнання з орієнтацією на можливість його багаторазового використання, ремонту та утилізації. Такий підхід дозволяє мінімізувати обсяги відходів, що виникають під час функціонування та технічного обслуговування мережевої інфраструктури, сприяючи сталому розвитку галузі та зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище.

У рамках функціонування мереж п'ятого покоління інтелектуальні технології, зокрема штучний інтелект і машинне навчання, відіграють важливу роль в оптимізації енергоспоживання та підвищенні загальної ефективності мережевих процесів. Завдяки використанню алгоритмів машинного навчання

стає можливим здійснювати прогнозування мережевого навантаження, що дає змогу динамічно розподіляти ресурси й забезпечувати раціональне споживання енергії [19].

Таблиця 1.1 - Принципи зелених технологій в мережах 5G

Принцип	Опис
Енергоефективність	Скорочення енергоспоживання в мережевому обладнанні та інфраструктурі 5G можливе завдяки впровадженню низки технологічних рішень. Серед них — застосування високоефективних апаратних компонентів, реалізація концепції віртуалізації мережевих функцій (NFV), адаптивне масштабування мережі відповідно до поточного навантаження, а також удосконалення протоколів обміну даними з урахуванням енергозбереження.
Відновлювані джерела енергії	Застосування відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної та вітрової, для живлення обладнання та інфраструктури мереж дозволяє знизити залежність від традиційних викопних ресурсів і скоротити викиди парникових газів.
Циркулярна економіка	Інтеграція принципів циркулярної економіки в мережеве обладнання та інфраструктуру передбачає створення пристроїв з урахуванням можливості їх повторного використання, ремонту і переробки, а також мінімізацію відходів, що виникають під час експлуатації та технічного обслуговування.
Інтелектуальні мережі	Застосування штучного інтелекту і машинного навчання для оптимізації енергоспоживання в мережі передбачає динамічне управління трафіком, прогнозування навантаження та автоматичне регулювання параметрів мережі. Це сприяє зменшенню витрат енергії та підтриманню стабільної роботи системи.
Зелені дані	Зменшення негативного впливу на довкілля, який спричиняють центри обробки даних та інші мережеві ресурси для зберігання і обробки інформації, може бути забезпечене завдяки застосуванню більш енергоефективного обладнання, впровадженню віртуалізації серверів та оптимізації алгоритмів обробки даних. Ці заходи сприяють зниженню споживання енергії та пом'якшенню екологічних наслідків.

Поняття «зелених» даних посідає важливе місце серед екологічно орієнтованих технологій, що впроваджуються в архітектуру мереж 5G. Зменшення негативного впливу на довкілля з боку центрів обробки даних та інших інфраструктурних компонентів, пов'язаних із зберіганням і обробкою інформації, можливе завдяки використанню енергоощадного обладнання, віртуалізації серверних потужностей та удосконаленню алгоритмів обробки даних. У сукупності ці заходи сприяють формуванню більш стійких, енергоефективних і екологічно безпечних мережевих рішень, що відповідають концепції сталого розвитку цифрового суспільства.

### 1.3 Глобальні стандарти та регуляції щодо енергоефективності в мережах 5G

У сфері розвитку мереж 5G надзвичайно важливе значення мають міжнародні стандарти та нормативні документи, що регламентують питання енергоефективності. Вони відіграють ключову роль у впровадженні єдиних підходів до оцінки, вимірювання та вдосконалення показників енергозбереження в телекомунікаційних системах нового покоління. Серед основних стандартів, що містять технічні вимоги, методики оцінювання та практичні рекомендації щодо підвищення енергоефективності, варто відзначити 3GPP TS 23.007, ETSI TS 123 409, IEEE Std 1900.2-2021, а також ITU-T Recommendation M.2020-1.

Таблиця 1.2 - Міжнародні стандарти та норми для 5G

Стандарт/норма	Організація	Мета
3GPP TS 23.007	3GPP	Визначення методів вимірювання та звітності про енергоефективність 5G
ETSI TS 123 409	ETSI	Вимоги до енергоефективності базових станцій 5G
IEEE Std 1900.2-2021	IEEE	Рекомендації щодо енергоефективного проектування та експлуатації мереж 5G
ITU-T Rec. M.2020-1	ITU	Вимоги до енергоефективності мереж 5G

Стандарт 3GPP TS 23.007 регламентує підходи до оцінювання енергоспоживання ключових компонентів мережі 5G, зокрема базових станцій, мережевих елементів та кінцевих користувачьких пристроїв. У документі визначено низку показників енергоефективності, серед яких енергоефективність на одиницю переданої інформації (bit/J) та енергоефективність з урахуванням просторової щільності (bit/m<sup>2</sup>/J). Ці метрики дають змогу кількісно оцінити ефективність використання енергетичних ресурсів у межах телекомунікаційної інфраструктури.

Документ ETSI TS 123 409 визначає технічні вимоги щодо енергоефективності для базових станцій мереж п'ятого покоління. У цьому стандарті встановлено гранично допустимі рівні енергоспоживання обладнання залежно від режимів його роботи, а також наведено рекомендації стосовно проектування та експлуатації базових станцій із урахуванням принципів енергозбереження [2].

Стандарт IEEE Std 1900.2-2021 присвячений рекомендаціям із проектування та експлуатації мереж 5G з урахуванням енергоефективності. У ньому розглядаються аспекти вибору відповідних технологічних рішень, оптимізація структури мережі та механізми управління енергоспоживанням. Застосування положень цього документа дозволяє не лише скоротити енергетичні витрати, а й підвищити надійність і стійкість телекомунікаційної інфраструктури.

Рекомендація ITU-T Rec. M.2020-1 встановлює технічні вимоги щодо енергоефективності мереж п'ятого покоління, зокрема регламентує максимально допустимі показники споживання енергії на одиницю трафіку. Крім того, документ містить рекомендації, спрямовані на оптимальне планування та експлуатацію мереж 5G з урахуванням збереження енергоресурсів.

Впровадження зазначених стандартів і норм суттєво впливає на розвиток мереж п'ятого покоління, зокрема у напрямку підвищення їх енергоефективності. Зменшення споживання енергії не лише сприяє підвищенню економічної вигоди для операторів зв'язку, а й має вагоме екологічне значення. Зниження обсягів викидів парникових газів та інших

шкідливих речовин є одним із ключових результатів застосування енергозберігаючих технологій у 5G. Окрім цього, скорочення витрат на утримання мережі підвищує її надійність, особливо в умовах нестабільного електропостачання.

Застосування цих стандартів і нормативів відіграє ключову роль у забезпеченні сталого розвитку мереж 5G, адже вони сприяють зменшенню енергозалежності та покращенню екологічного стану телекомунікаційної сфери. Дотримання цих вимог дозволяє ефективно використовувати наявні ресурси та знижувати негативний вплив на довкілля, що є особливо важливим у сучасних умовах зростаючого попиту на зв'язок та інформаційні технології [1].

#### 1.4 Типові випадки застосування мереж 5G

Мобільні мережі п'ятого покоління (5G) відкривають нову еру в сфері бездротових комунікацій, пропонуючи користувачам надзвичайно високу швидкість обміну даними та мінімальні затримки сигналу. Завдяки цим характеристикам стає можливим впровадження інноваційних рішень у різноманітних сферах — від промисловості до медицини. Водночас з розширенням функціональних можливостей таких мереж постає серйозне питання зростання енергоспоживання, що, у свою чергу, викликає потребу в розробці нових підходів до підвищення їх енергоефективності. Це завдання є стратегічно важливим для забезпечення довготривалої експлуатації та економічної доцільності технологій нового покоління.

Однією з основних сфер застосування мереж п'ятого покоління є мобільний широкосмуговий зв'язок, який включає доступ до Інтернету, перегляд потокового відео, онлайн-ігри та інші сучасні мультимедійні сервіси. Висока пропускна здатність та швидкість передавання даних, характерні для 5G, призводять до зростання енергоспоживання мобільних пристроїв. Це створює потребу у впровадженні ефективних механізмів оптимізації, як на рівні програмного забезпечення, так і апаратних компонентів, щоб знизити

навантаження на джерела живлення та забезпечити тривалу автономну роботу пристроїв.



Рисунок 1.2 - Застосування мережі 5G [2]

Ще одним ключовим напрямом застосування мереж 5G виступає концепція Інтернету речей (IoT), що передбачає масове підключення різноманітних пристроїв і сенсорів до глобальної мережі. Для ефективного функціонування такої інфраструктури критично важливими є мінімальне енергоспоживання та можливість охоплення великої території. Реалізація цих вимог стає можливою завдяки впровадженню 5G-технологій з низьким енергоспоживанням та широким радіусом дії, зокрема рішень класу LPWAN (Low Power Wide Area Network), які ідеально підходять для обслуговування IoT-пристроїв.

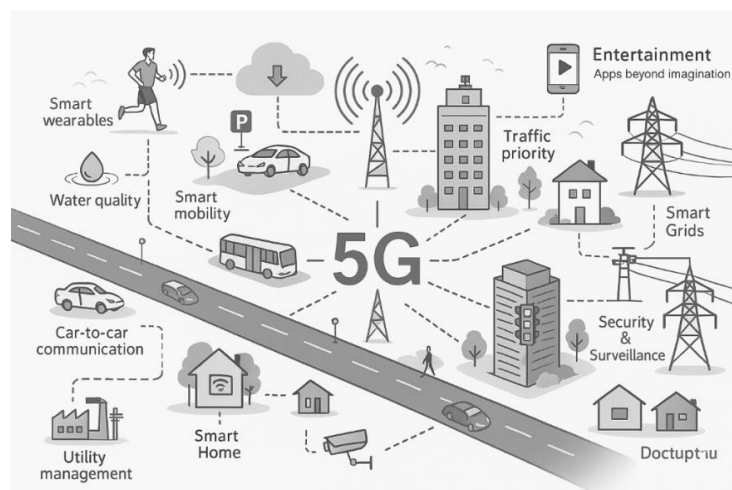


Рисунок 1.3 - Схематичне зображення застосування Інтернету речей (IoT) на базі бездротової мережі 5G

Машинна взаємодія (M2M) становить ще один стратегічно важливий напрям використання мереж п'ятого покоління, у якому передбачено автоматизований обмін даними між пристроями без залучення людини. Для реалізації подібних сценаріїв необхідна надвисока надійність зв'язку та максимально низькі затримки передачі інформації. Ці вимоги забезпечуються завдяки застосуванню технологій 5G, зокрема URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications), які дозволяють створити стабільні й оперативні канали зв'язку між машинами в реальному часі [13].

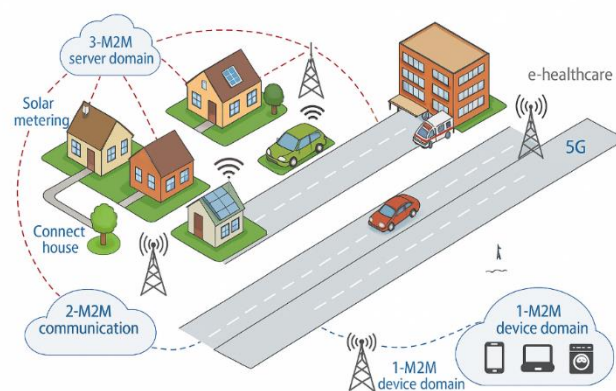


Рисунок 1.4 - Приклад архітектури M2M-взаємодії на базі бездротових технологій 5G

Серед перспективних напрямів застосування технологій 5G варто виокремити віртуальну та доповнену реальність (VR/AR), які потребують миттєвого передавання великих обсягів мультимедійної інформації для забезпечення плавної та реалістичної взаємодії користувача з цифровим середовищем. Реалізація таких сервісів вимагає надвисокої пропускної здатності мережі та мінімальних затримок сигналу. Досягти цього дозволяють 5G-рішення, зокрема технологія mmWave (міліметрові хвилі), що забезпечує необхідну швидкість і стабільність з'єднання для коректної роботи VR/AR-додатків.

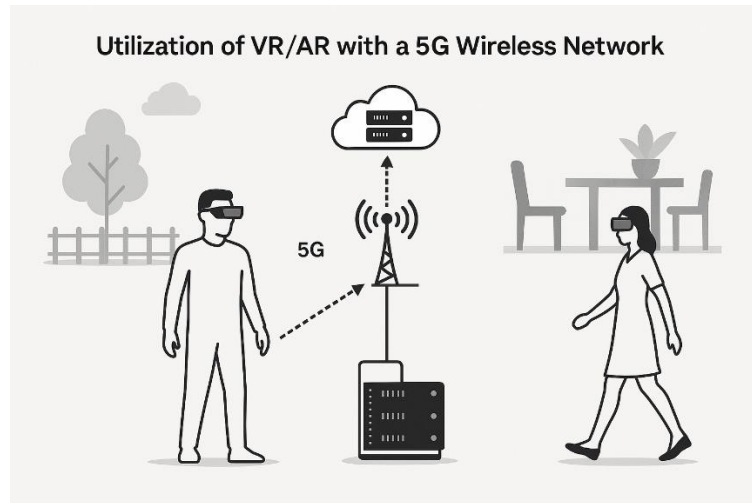


Рисунок 1.5 - Схематичне представлення застосування VR/AR через бездротову мережу 5G

Серед ключових напрямів упровадження 5G-технологій особливе місце займають інтелектуальні (smart) міста, де мережі нового покоління використовуються для інтеграції різноманітних елементів міської інфраструктури — від систем освітлення до громадського транспорту та засобів безпеки. Ефективне функціонування таких рішень потребує як мінімального енергоспоживання, так і надійного покриття на великих територіях. Ці вимоги реалізуються через впровадження технологій 5G, зокрема на базі стандарту LPWAN (Low Power Wide Area Network), який оптимально підходить для розгалужених урбаністичних середовищ.



Рисунок 1.6 - Інтеграція концепції SmartCity із застосуванням технології

5G

Поява мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G) створює передумови для реалізації сучасних технологічних рішень у міському середовищі. Завдяки високій швидкості передавання даних, зменшеній затримці сигналу та значній пропускній здатності, 5G сприяє розвитку інноваційних сервісів у межах концепції «розумного міста». Проте впровадження таких технологій супроводжується і певними труднощами, зокрема в екологічній та соціальній площинах. Серед основних викликів — збільшення енергоспоживання та фінансові витрати на створення й обслуговування інфраструктури. Це вимагає раціонального управління ресурсами та впровадження рішень, орієнтованих на зниження негативного впливу на довкілля.

Питання енергоефективності є одним з ключових у контексті стійкого розвитку мереж нового покоління. Оптимізація архітектури системи та енергоспоживання базових станцій і користувачьких пристроїв дозволяє істотно скоротити використання електроенергії. У цьому процесі важливу роль відіграє технологія MIMO (багатоантенне передавання та прийом сигналу), яка підвищує ефективність використання радіочастотного спектру без потреби у додаткових базових станціях. Одночасна робота кількох антен забезпечує передачу великої кількості даних із меншими енергетичними витратами, що позитивно впливає на загальну екологічну стійкість системи.

Застосування сучасних енергоощадних технологій у мережах 5G суттєво сприяє підвищенню їх загальної енергоефективності. Це має надзвичайно важливе значення як у контексті скорочення витрат на експлуатацію, так і з огляду на екологічну безпеку, оскільки дає змогу зменшити обсяг викидів парникових газів і знизити навантаження на природні ресурси [6].

Наукові дослідження свідчать про те, що впровадження мереж п'ятого покоління може забезпечити зменшення споживання енергії до 90% на один переданий біт у порівнянні з технологіями четвертого покоління. Такий прорив в енергоефективності не лише скорочує витрати для операторів зв'язку, а й забезпечує позитивний вплив на довкілля. Раціональне використання енергії сприяє зниженню викидів шкідливих речовин, зменшенню споживання

викопного палива та формує підгрунття для довготривалої екологічної стійкості телекомунікаційної інфраструктури.

Для повноцінного використання потенціалу енергоефективності мереж п'ятого покоління необхідно розглядати їхній вплив на довкілля як частину єдиної екосистеми. Проектування та розміщення інфраструктурних елементів повинні здійснюватися з урахуванням мінімального втручання у природні середовища та зменшення візуального навантаження на ландшафт. Не менш важливим є належне управління електронними відходами, що виникають у процесі розбудови та модернізації мереж 5G, аби запобігти їх шкідливому впливу на навколишнє середовище. Одним із ключових напрямів екологічної трансформації телекомунікаційної галузі є використання альтернативних джерел енергії для забезпечення роботи інфраструктури. Перехід на відновлювані енергоресурси сприяє зниженню залежності від традиційних, невідновлюваних енергетичних джерел, зокрема викопного палива, і водночас підтримує курс на сталий розвиток галузі.

Таким чином, хоча мережі 5G мають значний потенціал у зменшенні енергоспоживання й оптимізації екологічного балансу, їхнє впровадження повинно супроводжуватися комплексним урахуванням екологічних аспектів. Лише за умов інтеграції сталих практик на всіх етапах – від планування до експлуатації – можна досягти гармонійного поєднання технологічного прогресу з екологічною безпекою, забезпечивши при цьому підвищення якості життя та збереження природних ресурсів [14].

### 1.5 Оцінка та порівняння технологічних підходів до зниження енергоспоживання в 5G мережах

Однією з ключових технологій, що визначають ефективність і продуктивність мереж п'ятого покоління, є масивні системи множинного прийому та передавання (Massive MIMO). Суть цієї технології полягає у використанні значної кількості антенних елементів для одночасної передачі та прийому сигналів, що дає змогу суттєво розширити пропускну здатність каналів

зв'язку та підвищити спектральну ефективність. Завдяки широкомасштабному застосуванню антен, Massive MIMO забезпечує обробку великих обсягів даних із мінімальними затримками та знижує загальне навантаження на мережеву інфраструктуру. Просторове мультиплексування, притаманне цій технології, дозволяє передавати більшу кількість інформації при зниженому рівні енергоспоживання, що особливо важливо у контексті енергоефективності мереж нового покоління. Крім підвищення якості зв'язку та обслуговування кінцевих користувачів, впровадження Massive MIMO сприяє скороченню викидів парникових газів. Це досягається за рахунок оптимального використання енергетичних ресурсів, що робить телекомунікаційні системи більш адаптивними до сучасних екологічних викликів і сприяє їхній довгостроковій стійкості в умовах енергетичних змін [5].

Мережі п'ятого покоління (5G) відкривають нові можливості для розвитку сучасних цифрових сервісів завдяки високій швидкості передавання даних, низьким затримкам і великій пропускну здатності. Проте впровадження цієї технології потребує врахування низки екологічних та енергетичних аспектів. Однією з ключових складових у забезпеченні ефективності 5G є технологія масивних систем множинного прийому-передавання (Massive MIMO), яка передбачає використання великої кількості антен для одночасної роботи з численними потоками даних. Такий підхід реалізує просторове мультиплексування, дозволяючи формувати незалежні канали зв'язку в межах одного частотного діапазону, що значно підвищує спектральну ефективність і пропускну здатність мережі без необхідності в додаткових радіочастотах. Крім того, Massive MIMO сприяє оптимізації енергоспоживання, оскільки дає змогу досягти високої продуктивності при зменшенні кількості базових станцій і потужностей передавання, що, у свою чергу, знижує викиди парникових газів і зменшує навантаження на природні ресурси. Для забезпечення стійкого функціонування таких мереж важливо також враховувати екологічні наслідки розміщення інфраструктури, запобігати візуальному забрудненню середовища, відповідально утилізувати електронні відходи та впроваджувати відновлювані джерела енергії для живлення систем. Лише комплексний підхід до

впровадження 5G з урахуванням екологічної відповідальності дозволить максимально розкрити потенціал цієї технології, покращити якість життя, зберегти природні ресурси й забезпечити сталий розвиток телекомунікаційної галузі.

Формування пучка (beamforming) є ключовою технологією в системах масивних МІМО, що дає змогу антенному масиву спрямовувати радіохвилі безпосередньо до конкретного користувача. Такий підхід забезпечує більш раціональне використання енергії, адже сигнал надсилається лише у визначеному напрямку. В результаті це сприяє зниженню загального енергоспоживання при передачі даних.

Одним із ключових переваг масивних МІМО-систем є їхня здатність значно збільшувати пропускну здатність у порівнянні з традиційними МІМО-рішеннями, що робить їх особливо актуальними для 5G-мереж, які очікують значне зростання обсягів трафіку. Крім того, ці системи дозволяють суттєво зменшити енергоспоживання — іноді на десятки відсотків — та підвищити надійність зв'язку завдяки використанню просторової різноманітності сигналів.



Рисунок 1.7 - Виклики впровадження масивних МІМО систем[31]

Втім, реалізація систем з масивними МІМО супроводжується низкою викликів. Насамперед, це стосується технічної складності проектування та

впровадження таких рішень, оскільки вони потребують значної кількості антен та використання спеціалізованих обчислювальних методів. Це суттєво ускладнює практичну реалізацію таких технологій.

Окрім того, фінансова сторона також є вагомим чинником: вартість розгортання масивних МІМО зазвичай перевищує витрати на традиційні системи, що може стримувати їх масштабне використання [15].

Серед додаткових викликів, що виникають під час впровадження технології масивних МІМО, варто виділити значні вимоги до обчислювальних ресурсів, необхідних для ефективної обробки сигналів. Це може мати негативний вплив на загальну продуктивність системи. У міських агломераціях із високою щільністю користувачів додаткову проблему становить взаємна інтерференція між різними антенними масивами, яку необхідно мінімізувати для підтримки стабільного рівня зв'язку.

Таким чином, масивні МІМО системи відкривають значні перспективи для вдосконалення параметрів бездротових комунікацій, особливо в контексті мереж п'ятого покоління. Водночас їх успішне впровадження вимагає комплексного інженерного підходу: оптимального проектування апаратної частини, зваженого розподілу фінансових ресурсів і застосування ефективних алгоритмів цифрової обробки сигналів для досягнення максимальної стабільності та продуктивності системи. [15].

Однією з ключових технологій, що забезпечують ефективність сучасних бездротових мереж, є *beamforming*. Вона дозволяє спрямовувати передавання радіосигналу у певний напрямок, що істотно покращує параметри з'єднання, зокрема якість сигналу та енергоспоживання. Цей метод базується на застосуванні антенних решіток, які формують вузьконаправлені пучки сигналу, орієнтовані на конкретного користувача або пристрій. Завдяки цьому вдається значно знизити рівень перешкод та оптимізувати споживання енергії. У рамках мереж 5G *beamforming* зазвичай поєднується з технологією масивного МІМО, що дозволяє використовувати велику кількість антен одночасно. Це підвищує точність передачі даних і забезпечує високу пропускну здатність каналу при зниженні енергетичних витрат. Ключовим аспектом цієї технології є управління

фазами й амплітудами сигналів, які надходять з різних антен, для створення конструктивної інтерференції у бажаному напрямку.

Серед основних переваг beamforming варто виділити його здатність покращувати співвідношення сигнал/шум (SNR) за рахунок когерентного підсумовування сигналів. Це дозволяє підсилити радіохвилю у визначеному напрямку та одночасно пригнічувати сигнали, що надходять з небажаних джерел. Такий підхід забезпечує стабільне з'єднання навіть у складних умовах із високим рівнем інтерференції та численними джерелами шуму [12].

Таблиця 1.3 - Порівняння Beamforming та традиційного передавання

Характеристика	Beamforming	Традиційне передавання
Фокус сигналу	Спрямовує сигнал у певному напрямку	Спрямовує сигнал у всіх напрямках
SNR	Покращує SNR	Не покращує SNR
Витрати енергії	Зменшує витрати енергії	Збільшує витрати енергії
Пропускна здатність	Збільшує пропускну здатність	Не збільшує пропускну здатність
Покриття	Збільшує покриття	Не збільшує покриття
Затримка	Зменшує затримку	Не зменшує затримку
Надійність	Підвищує надійність	Не підвищує надійність

Однією з ключових переваг технології формування променя (beamforming) є зниження енергоспоживання завдяки точному спрямуванню сигналів до конкретних користувачів. На відміну від традиційного розподілу сигналу в усіх напрямках, ця технологія створює сфокусований промінь, що забезпечує передачу даних лише в потрібному напрямку. Такий метод не тільки оптимізує використання енергії, але й сприяє підвищенню енергоефективності мережевої інфраструктури. Це особливо важливо в умовах зростання кількості підключених пристроїв і збільшення обсягів передачі даних [16].

У контексті 5G-мереж технологія формування променя (beamforming) відіграє вирішальну роль у забезпеченні високої якості зв'язку та ефективності передачі даних. Завдяки застосуванню масивних MIMO-систем реалізуються адаптивні алгоритми, які дозволяють динамічно налаштовувати просторове фокусування сигналу залежно від змін умов каналу зв'язку. Такий підхід

гарантує мережам 5G гнучкість і надійність навіть у ситуаціях із високим навантаженням або в складних умовах прийому сигналу.

У рамках технологій 5G концепція мережевого сегментування (network slicing) є інноваційним методом управління мережевою інфраструктурою, який забезпечує гнучке та ефективне розподілення ресурсів відповідно до потреб конкретних застосунків і користувачів. Цей підхід дозволяє створювати віртуальні ізольовані сегменти мережі, кожен із яких налаштований для певного сценарію використання. Така технологія відіграє ключову роль у забезпеченні підтримки різноманітних сервісів — від звичайного мобільного зв'язку до високонадійних застосувань, таких як автономні транспортні засоби чи рішення для телемедицини.

Впровадження мережевого сегментування в архітектурі 5G має незаперечні переваги. Основною характеристикою цього підходу є його гнучкість і здатність до масштабування, що дозволяє мережі адаптуватися до мінливих умов і потреб без значних ресурсних витрат. За допомогою динамічного створення, видалення та налаштування віртуальних сегментів, або слайсів, можливо оперативно регулювати такі параметри, як пропускна здатність, затримка або надійність, забезпечуючи ефективну підтримку різноманітних застосунків.

Однією з основних переваг мережевого сегментування є оптимальне використання ресурсів і зростання енергоефективності. Цей метод забезпечує раціональний розподіл мережевих можливостей, що сприяє зниженню витрат при збереженні високої якості обслуговування. Особливо важливим це стає в умовах пікових навантажень, коли гнучка реакція мережі на зміни трафіку відіграє ключову роль у забезпеченні стабільної роботи сервісів [20].

Додатково, мережеве сегментування значно посилює безпеку завдяки ізоляції окремих потоків даних залежно від їхнього призначення. Такий підхід зменшує ризик взаємного впливу між сегментами, що є критично важливим для застосунків у таких сферах, як медицина чи транспортна логістика, де порушення цілісності або доступності даних може призвести до серйозних наслідків.

Таблиця 1.4 - Порівняння традиційних мереж та мереж з мережевим слайсингом 5G

Характеристика	Традиційні мережі	Мережі з мережевим слайсингом 5G
Точність Використання	Обмежена	Підвищена
Можливість розширення	Складна та витратна	Економічна та зручна
Використання ресурсів	Недостатньо ефективне	Оптимальне
Енергоефективність енергії	Низька	Значно вища
Захист даних	Низький рівень	Підвищений

Ефективне впровадження мережевого слайсингу в архітектурі 5G передбачає врахування низки критично важливих чинників. Одним із ключових елементів цього процесу є повноцінна віртуалізація мережевої інфраструктури, яка забезпечує можливість створення керованих програмно віртуальних екземплярів мережевих ресурсів. Це відкриває шлях до гнучкого та централізованого управління мережею. Важливою складовою також є розробка спеціалізованих програмних платформ, які здатні автоматично контролювати життєвий цикл слайсів — від їхнього створення та налаштування до видалення та безперервного моніторингу продуктивності. Такий підхід дозволяє не лише підвищити ефективність роботи мережі, а й забезпечити адаптивність до динамічних змін у навантаженні та вимогах сервісів.

Одним із ключових напрямів є створення та впровадження стандартів і протоколів, що забезпечують роботу мережевого сегментування в 5G. Наприклад, міжнародні організації, такі як 3GPP, зосереджені на розробці чітких правил взаємодії між сегментами, розподілу ресурсів і гарантування безпеки. Ці стандарти формують основу для практичного застосування та розробки рішень, які дозволяють ефективно використовувати мережеве сегментування в реальних умовах [21].

Таким чином, технологія мережевого сегментування відіграє центральну роль у розвитку 5G-мереж, відкриваючи численні можливості для вдосконалення мережевих сервісів і застосунків. Вона гарантує потрібний рівень адаптивності, продуктивності та безпеки, що є критично важливим для різних галузей використання. Завдяки цьому сегментування стає невід'ємним елементом

еволюції сучасних цифрових систем, сприяючи оптимальному розподілу ресурсів і задоволенню зростаючих вимог мобільних технологій та послуг.

Мережі 5G створюють нові можливості для мобільного зв'язку, значно підвищуючи пропускну здатність, знижуючи затримки та розширюючи зону покриття. Проте зі зростанням функціональності мереж збільшується їх енергоспоживання, що створює виклики для операційних витрат і впливу на довкілля. У цьому контексті важливе значення має розробка та застосування енергоефективних рішень, зокрема технології динамічного регулювання потужності (ДРП). Цей підхід дає змогу оптимізувати витрати енергії шляхом адаптації потужності мережевих компонентів до поточного рівня навантаження та умов експлуатації, що дозволяє скоротити загальне енергоспоживання без погіршення продуктивності чи якості зв'язку.

У рамках 5G технологія динамічного регулювання потужності (ДРП) відіграє ключову роль, оптимізуючи енергоспоживання мережі завдяки гнучкому налаштуванню потужності базових станцій (БС). Система автоматично адаптує рівень потужності залежно від змін навантаження, часу доби чи інших умов, що дає змогу суттєво зменшити енергоспоживання у потрібні моменти. Основна мета цієї технології — скорочення витрат енергії, підвищення ефективності роботи мережі та забезпечення її надійності навіть за високих навантажень. Це сприяє як економії витрат операторів, так і зниженню екологічного впливу від функціонування 5G-мереж.

Однією з головних переваг технології динамічного регулювання потужності є зменшення енергоспоживання. Адаптація потужності базових станцій (БС) у режимі реального часу дає змогу мережі гнучко реагувати на зміни навантаження, оптимізуючи енергетичні витрати. Під час пікового трафіку система автоматично збільшує потужність, забезпечуючи надійне з'єднання та високу якість обслуговування. У періоди низького навантаження потужність знижується, що значно скорочує витрати енергії без негативного впливу на користувачів.

Технологія динамічного регулювання потужності також значно підвищує продуктивність мережі. Оптимізація розподілу ресурсів і більш ефективне

використання енергії між базовими станціями робить мережу гнучкішою та здатною адаптуватися до мінливих умов. Це сприяє покращенню якості обслуговування користувачів, гарантуючи надійне з'єднання та високу пропускну здатність навіть за змінного навантаження. Крім того, така оптимізація зменшує ймовірність перевантаження мережі та мінімізує ризик виникнення збоїв у підключенні.

Управління на основі трафіку відіграє ключову роль у технології динамічного регулювання потужності. Це дає змогу базовим станціям гнучко налаштовувати свою потужність залежно від змін у мережевому трафіку, забезпечуючи ефективну роботу в різних умовах. Збільшення потужності під час пікового трафіку гарантує стабільне з'єднання та високу швидкість для користувачів навіть за значного навантаження. Натомість у періоди низької активності зменшення потужності дозволяє суттєво економити енергію, що є важливим для підвищення енергоефективності 5G-мереж. Такий підхід забезпечує оптимальний баланс між продуктивністю та економією ресурсів.

Альтернативним методом є управління на основі якості обслуговування (QoS), яке спрямоване на підтримку ключових характеристик зв'язку для користувачів шляхом коригування потужності базових станцій залежно від якості сигналу та інших показників.

Ще одним підходом є метод управління на основі прогнозування, який застосовує передбачення майбутнього трафіку для адаптивного регулювання потужності базових станцій. Це дозволяє мережі завчасно підготуватися до пікових навантажень і оптимізувати витрати енергії [24].

Запровадження технології динамічного управління потужністю (ДМП) у 5G-мережах потребує інтегрованого підходу. Спочатку необхідно створити та інтегрувати розумні алгоритми ДМП, які враховуватимуть численні мережеві параметри, зокрема трафік, якість обслуговування (QoS) та стан базових станцій. Далі слід організувати інфраструктуру для збирання та обробки даних, що забезпечить точність і ефективність роботи системи ДМП. Критичним етапом є поєднання ДМП із наявними системами управління мережею (OSS/BSS), що гарантує безперервність роботи та сумісність із іншими мережевими функціями.

Отже, застосування динамічного управління потужністю відіграє ключову роль у забезпеченні енергоефективності мереж п'ятого покоління. Завдяки цьому підходу вдається зменшити загальне енергоспоживання, оптимізувати роботу мережевих компонентів та покращити показники якості обслуговування користувачів. Це, своєю чергою, сприяє створенню більш екологічно відповідальних і технологічно витривалих телекомунікаційних систем. Для успішної реалізації концепції ДУП слід комплексно підходити до її впровадження — від етапу розробки адаптивних алгоритмів до їхньої інтеграції у вже функціонуючу інфраструктуру мережевого управління.

Мережі п'ятого покоління (5G) представляють собою якісно новий етап еволюції бездротового зв'язку, що характеризується надвисокою швидкістю передачі даних, вкрай низькою затримкою сигналу та здатністю підтримувати масове підключення пристроїв у режимі реального часу. Завдяки цьому відкриваються широкі перспективи для впровадження технологій інтернету речей (IoT), інтелектуальних міських інфраструктур, автономного транспорту та інших передових рішень. Водночас із впровадженням цих інновацій постає серйозна проблема — суттєве зростання енергоспоживання, що може негативно позначитися на довгостроковій стійкості та ефективності функціонування таких мереж.

Підвищення енергоефективності мереж п'ятого покоління можливе шляхом удосконалення їхньої архітектури на різних структурних рівнях.

Одним із напрямів підвищення енергоефективності на рівні телекомунікаційної інфраструктури є впровадження технологій, що базуються на принципах віртуалізації та програмного управління. Зокрема, Network Function Virtualization (NFV) дозволяє перенести традиційні апаратні функції до програмного середовища, а Software-Defined Networking (SDN) забезпечує централізоване і гнучке керування потоками даних. Це дає змогу ефективно розподіляти ресурси відповідно до реального трафіку, знижуючи енергоспоживання у моменти низького навантаження. Також, завдяки зменшенню потреби у фізичному обладнанні, знижується кількість

енергозалежних елементів мережі, адже значна частина функцій реалізується на віртуалізованій основі [40].

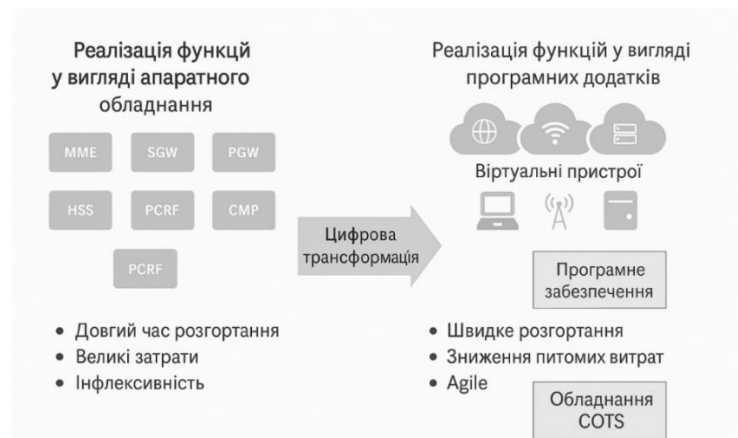


Рисунок 1.8 - Інтеграція віртуалізованих рішень SDN та NFV у мережеву інфраструктуру 5G [13]

На фізичному рівні архітектури 5G значний внесок у підвищення енерго- та спектральної ефективності робить технологія Massive MIMO. Її суть полягає у застосуванні великої кількості антен на базових станціях і, за можливості, на терміналах користувачів. Такий підхід дозволяє формувати велику кількість незалежних просторових каналів, через які одночасно передається великий обсяг даних. При цьому загальні енергетичні витрати залишаються на помірному рівні, оскільки сигнали передаються вузькоспрямовано, що знижує втрати на розсіювання та покращує ефективність використання енергії. [42].

Сучасні методи корекції помилок, зокрема коди з низькою щільністю перевірки на парність (LDPC) та полярні коди, відіграють важливу роль у підвищенні енергоефективності передачі даних у мережах п'ятого покоління. Ці схеми кодування забезпечують високий рівень надійності переданої інформації навіть при знижених рівнях потужності сигналу. Завдяки цьому передавальні пристрої можуть функціонувати в енергозберігаючому режимі без втрати якості зв'язку, що в кінцевому підсумку сприяє зменшенню енергоспоживання всієї мережі.

Використання міліметрового діапазону (mmWave) у мережах п'ятого покоління створює додаткові можливості для підвищення енергоефективності,

особливо в умовах високої концентрації користувачів. Незважаючи на обмежений радіус дії таких сигналів, mmWave-технології забезпечують надзвичайно високу швидкість передавання даних, що дозволяє оперативно обробляти великі обсяги трафіку. У міських середовищах із щільною забудовою та високою щільністю населення, де розміщення численних базових станцій є реалістичним, це сприяє більш ефективному використанню енергоресурсів на кожну одиницю переданої інформації, підвищуючи загальну продуктивність мережі.

Крім архітектурних змін, для досягнення вищої енергоефективності застосовуються також різноманітні інженерні рішення, що охоплюють оптимізацію апаратного забезпечення, алгоритмів обробки сигналів та протоколів управління енергоспоживанням.

Одним із важливих напрямків розвитку енергоефективності в 5G є впровадження сучасного енергоощадного обладнання. Виробники телекомунікаційних систем активно працюють над створенням нових рішень, які споживають менше енергії без втрати продуктивності. Новітні базові станції, маршрутизатори та інші елементи інфраструктури створюються з урахуванням екологічних стандартів та оптимізації енергоспоживання, що не лише сприяє зниженню навантаження на довкілля, але й зменшує витрати на обслуговування мережі.

Оптимізація програмного забезпечення також відіграє ключову роль у зменшенні енергоспоживання мереж 5G. Системне ПЗ, що відповідає за управління мережею та її елементами, може бути вдосконалене таким чином, щоб виконувати свої функції з мінімальними затратами ресурсів. Це включає в себе реалізацію адаптивного керування потужністю, раціональну маршрутизацію трафіку, а також застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування навантаження та ефективного розподілу ресурсів. Такий підхід дозволяє не лише зменшити енергоспоживання, а й підвищити загальну продуктивність мережі.

Моніторинг та управління енергоспоживанням відіграють вирішальну роль у забезпеченні ефективної роботи мереж 5G. Завдяки безперервному

спостереженню за споживанням енергії можна своєчасно виявляти ділянки з підвищеним навантаженням і вживати необхідних заходів для його зниження. До таких заходів можуть належати як модернізація апаратного забезпечення, так і впровадження програмних механізмів оптимізації. У сукупності це дозволяє гнучко адаптувати мережу до поточних умов, знижуючи енергоспоживання без шкоди для якості обслуговування.

Архітектура мережі 5G повинна бути побудована за багаторівневим принципом, охоплюючи як мережевий, так і фізичний рівні. На рівні мережі особливу увагу приділяють таким технологіям, як віртуалізація мережевих функцій (NFV) та програмно-визначене управління мережею (SDN). Завдяки віртуалізації можливо ефективно реалізовувати мережеві функції у вигляді програмного забезпечення, що дозволяє адаптувати ресурси відповідно до поточних потреб, зменшуючи надлишкове енергоспоживання. SDN, у свою чергу, забезпечує централізоване управління трафіком і дозволяє гнучко реагувати на зміни в навантаженні, оптимізуючи розподіл ресурсів та сприяючи підвищенню енергоефективності мережі.

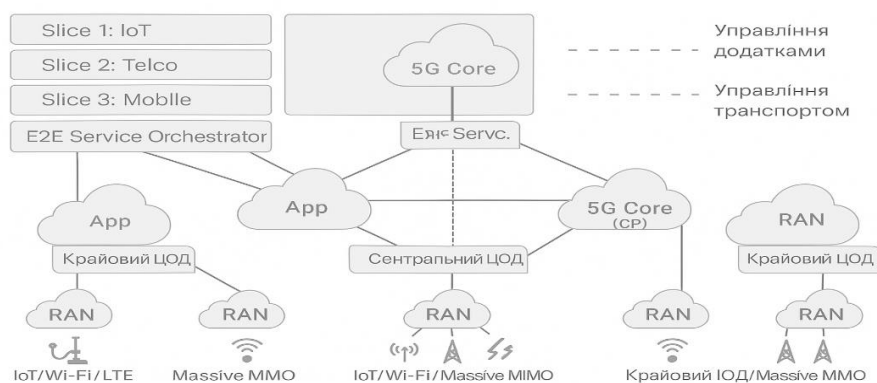


Рисунок 1.9 - Архітектура мережі п'ятого поголовіння(5G)

Однією з важливих технологій є багатопотоковий доступ із підтримкою кількох користувачів (Multi-User MIMO, MU-MIMO). Ця технологія дозволяє базовій станції одночасно обробляти запити від кількох абонентів, використовуючи той самий частотний діапазон. Завдяки цьому значно зростає спектральна ефективність, а енергоспоживання на одного користувача

зменшується. Крім того, інтелектуальне керування потужністю передачі, яке адаптується до поточного рівня мережевого навантаження та умов радіоканалу, сприяє додатковій економії енергоресурсів. Такий підхід забезпечує оптимальне співвідношення між високою якістю зв'язку та зниженням енергетичних витрат, що є ключовим для сучасних мереж 5G.

Технологія масивного MIMO (Multiple Input Multiple Output) відіграє центральну роль на фізичному рівні, використовуючи численні антени на базових станціях і пристроях користувачів. Це дозволяє значно підвищити ефективність використання радіоспектру та знизити енергоспоживання мережі. Також, застосування кодів із низькою щільністю перевірки на парність (LDPC) та полярних кодів сприяє ефективнішій корекції помилок, що покращує якість передачі даних і знижує енергетичні витрати. Використання міліметрових хвиль (mmWave), попри обмежений радіус покриття, забезпечує високу пропускну здатність у щільних міських мережах із високим навантаженням, що робить цю технологію енергоефективною для таких умов.

Енергоефективність компонентів мережі 5G можна значно підвищити завдяки впровадженню сучасних технологій. Зокрема, у підсистемі радіодоступу застосовується технологія формування променя (beamforming), яка спрямовує радіосигнал безпосередньо до цільового користувача. Це дозволяє суттєво зменшити енергоспоживання мережі. Використання такого підходу може забезпечити зниження енергетичних витрат до 70%, що має критичне значення для великих і щільних мереж.[17]

Для підвищення енергоефективності системи передачі даних застосовуються транзистори та модулі з низьким енергоспоживанням, що сприяє зниженню загальних енергетичних витрат. У ядрі мережі впровадження енергоощадних протоколів і вдосконалених алгоритмів маршрутизації забезпечує оптимальне використання ресурсів, що дозволяє значно скоротити енергоспоживання та зменшити експлуатаційні витрати.

Окрім архітектурних і функціональних рішень, значний внесок у підвищення енергоефективності мереж 5G роблять інженерні методи. Зокрема, використання обладнання з низьким енергоспоживанням відіграє ключову роль.

Виробники телекомунікаційних пристроїв постійно вдосконалюють свою продукцію, розробляючи енергоощадні компоненти, що сприяють зниженню загальних енергетичних витрат мережі. Окрім цього, оптимізація програмного забезпечення мережі відіграє важливу роль у підвищенні енергоефективності. Удосконалення алгоритмів управління ресурсами, зменшення затримок у обробці даних і підвищення ефективності їх обробки дозволяють суттєво скоротити енергоспоживання мережі.[42]

Ефективне управління енергоспоживанням мережі відіграє важливу роль у виявленні та виправленні зон із низькою енергоефективністю, що сприяє загальному підвищенню продуктивності системи. Для цього використовуються спеціалізовані програмні інструменти, які аналізують дані про енергоспоживання, а також автоматизовані системи керування. Такі системи дозволяють динамічно регулювати параметри мережі, забезпечуючи оптимальну ефективність і зниження енергетичних витрат.

## 1.6 Висновки до розділу 1

У першому розділі роботи, проведено детальний аналіз підходів і принципів, спрямованих на підвищення енергоефективності. Вивчення основних концепцій енергоощадності та їхнього впливу на роботу телекомунікаційних мереж підкреслило критичну роль цього аспекту для розвитку й ефективної експлуатації перспективних систем зв'язку.

На початковому етапі дослідження були проаналізовані ключові принципи енергоефективності, які відіграють важливу роль у розробці та забезпеченні продуктивної роботи мереж 5G. Встановлено, що зниження енергоспоживання в таких мережах є не лише економічно вигідним, але й стратегічно необхідним для гарантування стабільності та ефективності телекомунікаційної інфраструктури. Енергоефективність у мережах 5G забезпечує можливість підтримувати високу якість зв'язку при мінімальних витратах ресурсів, що є критично важливим для конкурентоспроможності та сталого розвитку сучасних систем зв'язку.

Подальший аналіз технологічних рішень, спрямованих на зменшення енергетичних витрат у мережах 5G, виявив широкий спектр підходів і стратегій. Дослідження показало, що ці рішення охоплюють різні аспекти, зокрема вдосконалення роботи обладнання, оптимізацію управління енергоспоживанням і розробку енергоощадних протоколів. Кожен із цих підходів має свої сильні та слабкі сторони, а їх вибір залежить від специфічних умов експлуатації та цілей, поставлених перед операторами телекомунікаційних мереж.

## 2 ПЕРЕДОВІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В МЕРЕЖАХ 5G

### 2.1 Застосування технологій штучного інтелекту та методів машинного навчання для підвищення ефективності енергоспоживання в мережах 5G

Швидке поширення мереж 5G призводить до значного зростання обсягів даних і навантаження на телекомунікаційну інфраструктуру, що, відповідно, збільшує енергоспоживання. Це створює важливі економічні та екологічні проблеми. Застосування технологій штучного інтелекту (ШІ) відіграє ключову роль у розв'язанні цих викликів шляхом підвищення енергоефективності. Системи на основі ШІ здатні аналізувати великі обсяги інформації про мережевий трафік, передбачати його динаміку та оптимізувати використання ресурсів у реальному часі. Це дозволяє знижувати енергетичні витрати, зберігаючи при цьому високу якість обслуговування.

Використання технологій штучного інтелекту (ШІ) у моніторингу мереж 5G відкриває численні можливості, зокрема зростання енергоефективності, покращення якості зв'язку, автоматизацію рутинних операцій і посилення захисту мережі. Застосування ШІ дозволяє операторам телекомунікаційних мереж знижувати енергоспоживання, що сприяє зменшенню експлуатаційних витрат і мінімізує екологічний вплив. Інтелектуальні алгоритми здатні прогнозувати періоди пікового навантаження та гнучко розподіляти ресурси, забезпечуючи стабільність мережі та високий рівень обслуговування користувачів. Автоматизація стандартних процесів моніторингу та управління дає змогу фахівцям зосередитися на вирішенні складніших завдань. Крім того, ШІ ефективно виявляє аномалії та потенційні загрози кібербезпеці, що значно підвищує надійність і безпеку мережі.

Штучний інтелект (ШІ) застосовується в мережах 5G для виконання різноманітних завдань, таких як передбачення мережевого трафіку, оптимізація використання радіочастотного спектру, управління енергоспоживанням базових

станцій і діагностика несправностей. Системи ШІ аналізують дані журналу подій про навантаження мережі, що дозволяє прогнозувати зміни трафіку та гнучко розподіляти ресурси для підвищення енергоефективності. Завдяки обробці даних про радіочастотний спектр ШІ сприяє збільшенню пропускної здатності мережі та зменшенню перешкод. Крім того, інтелектуальні системи забезпечують автоматичне регулювання енергоспоживання базових станцій залежно від рівня навантаження. Також ШІ допомагає оперативно виявляти технічні проблеми та усувати їх, що гарантує стабільну роботу мережі та покращує якість послуг для користувачів.

Застосування штучного інтелекту (ШІ) для моніторингу мереж 5G є багатообіцяючим напрямом, який сприяє значному підвищенню енергоефективності, покращенню якості послуг для користувачів і зменшенню екологічного впливу. Впровадження таких технологій підтримує сталий розвиток телекомунікаційної галузі та забезпечує ефективніше використання ресурсів у процесі цифрової трансформації.

Поява мереж 5G створює значні можливості для передачі даних у мобільних мережах, але водночас вимагає ефективнішого управління ресурсами. Традиційні методи, що базуються на статичних алгоритмах, часто не здатні забезпечити оптимальне використання ресурсів, що призводить до підвищеного енергоспоживання та погіршення якості зв'язку. У цьому контексті машинне навчання (МН) стає важливим інструментом, який дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів у мережах 5G, підвищуючи їхню ефективність і продуктивність.

### Застосування методів машинного навчання в мережах 5G

У мережах 5G машинне навчання застосовується для обробки великих обсягів даних, зокрема інформації про мережевий трафік, розташування користувачів, стан інфраструктури та показники якості послуг. Алгоритми МН здатні оперативно адаптувати розподіл ресурсів, враховуючи динамічні зміни в умовах мережі та потребах користувачів. Такий підхід дає змогу оптимізувати

використання ресурсів у режимі реального часу, підвищуючи ефективність роботи мережі та покращуючи якість обслуговування[11].

Застосування машинного навчання (МН) у мережах 5G забезпечує низку значних переваг. По-перше, МН сприяє підвищенню енергоефективності шляхом інтелектуального розподілу ресурсів лише там, де це необхідно, що знижує енергетичні витрати та зменшує вплив на довкілля. По-друге, МН покращує якість надання послуг, забезпечуючи оптимальне виділення ресурсів у потрібний час, що сприяє зменшенню затримок і підвищенню пропускної здатності мережі. Нарешті, гнучкість і адаптивність МН дозволяють ефективно управляти ресурсами навіть у динамічних умовах із швидкими змінами навантаження.

Одним із ключових застосувань машинного навчання (МН) у мережах 5G є інтелектуальне розподілення смуги пропускання. Алгоритми МН обробляють дані про мережевий трафік і використання ресурсів, щоб у реальному часі оптимально розподіляти пропускну здатність між користувачами. Це сприяє підвищенню ефективності використання доступного частотного ресурсу та покращенню якості зв'язку. Ще одним важливим аспектом є оптимізація енергоспоживання, де МН допомагає ідентифікувати базові станції з низькою активністю та тимчасово вимикати їх, що дозволяє зменшити енергетичні витрати без впливу на якість надання послуг.

Машинне навчання (МН) виступає потужним інструментом для ефективного управління ресурсами в мережах 5G. Воно сприяє зниженню енергоспоживання, підвищенню якості зв'язку та забезпеченню адаптивного розподілу мережевих ресурсів. З удосконаленням технологій МН і зростанням обсягів даних для аналізу очікується, що його значення в оптимізації роботи мереж 5G значно зросте, дозволяючи досягти більш раціонального використання ресурсів і покращення користувацького досвіду.

Зменшення інерційності функціонування мережі є одним із ключових напрямів підвищення її енергоефективності в умовах 5G. Суть цієї стратегії полягає в автоматизованому керуванні процесами в мережевій інфраструктурі з метою уникнення надмірного споживання енергії. Центральним елементом

такого підходу виступає адаптивне управління ресурсами — мережа в режимі реального часу змінює параметри розподілу ресурсів (зокрема потужності та пропускної здатності) залежно від актуального навантаження. Завдяки цьому забезпечується раціональне використання технічних можливостей у періоди часткової або неповної завантаженості, що сприяє загальному зменшенню енергетичних витрат.

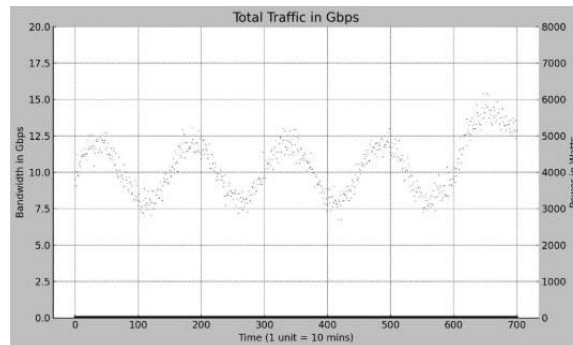


Рисунок 2.1 - Показник пропускної здатності в мережах 5G [31]

Ще однією важливою стратегією є прогнозування трафіку. Цей підхід передбачає застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування обсягів трафіку в мережі на майбутнє. Завдяки цьому мережа може заздалегідь адаптуватися до пікових навантажень та ефективно розподіляти ресурси, що сприяє зниженню енергетичних витрат та підвищенню продуктивності мережі.

Також важливою стратегією є застосування сплячого режиму. Це передбачає переведення неактивних вузлів мережі в стан, коли їхнє енергоспоживання мінімальне. Такий підхід є ефективним методом економії енергії, особливо в ситуаціях, коли частина мережі не використовується протягом тривалого часу.

Крім того, важливу роль у зниженні інерційності мережі відіграє оптимізація її топологічної структури. Завдяки такому підходу мережа здатна гнучко перебудовувати свою архітектуру в реальному часі з метою підвищення енергоефективності. Зокрема, перенаправлення трафіку за енергетично доцільнішими маршрутами або тимчасова активація резервних вузлів може суттєво зменшити загальне споживання електроенергії [10, с. 204].

Таблиця 2.1 - Порівняння традиційних та інноваційних підходів до енергоефективності мереж 5G

Підхід	Опис	Переваги	Недоліки
Традиційний	До недоліків традиційного підходу належать статичне розподілення ресурсів, відсутність механізмів прогнозування мережевого трафіку та обмежене використання енергозберігаючих режимів, таких як переведення обладнання у сплячий стан під час простою.	Простота реалізації	Дуже Низька енергоефективність
Інноваційний	До основних механізмів підвищення енергоефективності в мережах 5G належать динамічне керування ресурсами, інтелектуальне прогнозування мережевого трафіку, застосування режимів сну для базових станцій у періоди низького навантаження, а також структурна оптимізація топології мережі.	Серед ключових переваг впровадження енергоефективних технологій у мережах 5G варто виділити зменшення споживання електроенергії, зниження викидів парникових газів, підвищення загальної надійності мережевої інфраструктури, покращення пропускної здатності та оптимізацію витрат на експлуатацію.	Реалізація подібних підходів супроводжується низкою викликів, серед яких — висока складність впровадження, необхідність розробки та використання складних алгоритмів машинного навчання, потреба в обробці великих масивів даних, а також потенційні ризики, пов'язані з надійністю системи.

Впровадження методів зменшення інерційних характеристик мережі приносить численні переваги. Насамперед, це сприяє скороченню енергоспоживання системи, що має позитивний вплив на навколишнє середовище за рахунок зниження обсягів викидів вуглекислого газу та інших

парникових газів. Крім того, такий підхід забезпечує економію електричної енергії, що дозволяє зменшити витрати на експлуатацію та технічне обслуговування мережі. Також це підвищує стабільність і надійність роботи мережі шляхом оптимізації розподілу ресурсів і збільшення її пропускної спроможності.

Збільшення попиту на мобільні пристрої та сервіси, спрямовані на обробку інформації, стало головним фактором значного зростання обсягів мережевого трафіку в системах 5G. Це спричиняє низку технічних викликів, зокрема підвищення енергоспоживання та затримки під час передачі даних. У зв'язку з цим, оптимізація управління даними відіграє вирішальну роль у забезпеченні енергоефективності, стабільності роботи та високого рівня якості послуг у мережах 5G.

Одним із провідних способів підвищення ефективності передачі даних у мережах 5G є застосування сучасних алгоритмів стиснення. Ці алгоритми забезпечують значне зменшення обсягу даних, що передаються, зберігаючи їхню цілісність або з мінімальними втратами якості. Такий підхід сприяє зниженню споживання електроенергії, підвищенню пропускної здатності мережі, скороченню затримок у передачі та покращенню якості наданих послуг.

У мережах 5G застосовуються різні типи алгоритмів стиснення даних. Алгоритми з втратами, такі як JPEG для обробки зображень або MPEG для відеоконтенту, ефективні в ситуаціях, коли допустима незначна втрата якості. Для даних, що потребують високої точності, використовуються алгоритми без втрат, наприклад LZMA або Zstd. Крім того, адаптивні алгоритми, як-от Brotli, можуть гнучко налаштовуватися під різні типи даних і особливості умов передачі.

Таблиця 2.2 - Оптимізація управління даними в мережах 5G

Параметр	Опис
Проблема	Зростання обсягів даних, що передаються в мережах 5G, призводить до підвищення енергоспоживання та збільшення навантаження на канали зв'язку.
Рішення	Використання вдосконалених алгоритмів компресії для зменшення обсягу переданих даних без втрат інформації.
Переваги	-Зниження споживання енергії - Збільшення пропускної здатності каналу -Зменшення затримок - Покращення якості обслуговування
Методи	Алгоритми з втратами, такі як JPEG для зображень або MPEG для відеопотоків, ефективні в сценаріях, де незначне зниження якості є допустимим. Для забезпечення високої точності даних використовують алгоритми без втрат, наприклад LZMA або Zstd, які зберігають усю інформацію незважаючи на зовнішні чинники. Адаптивні алгоритми, такі як Brotli, дозволяють гнучко налаштовувати стиснення залежно від типу даних і умов мережі. Крім того, гібридні алгоритми поєднують переваги стиснення з втратами та без втрат, забезпечуючи баланс між ефективністю та якістю передачі даних.
Виклики	- Баланс між якістю стиснення та швидкістю обробки - Розробка алгоритмів для різних типів даних - Впровадження алгоритмів стиснення в мережеві протоколи
Перспективи	- Розробка нових алгоритмів стиснення з використанням штучного інтелекту - Використання моделей машинного навчання для прогнозування та оптимізації стиснення - Інтеграція алгоритмів стиснення з іншими енергоефективними технологіями

Одним із ключових завдань оптимізації передачі даних у мережах 5G є забезпечення гармонії між рівнем стиснення та швидкістю обробки інформації. Іншими словами, необхідно визначити оптимальний ступінь стиснення, який підвищить ефективність роботи мережі, не погіршуючи якість наданих послуг.

Для досягнення цієї мети розробляються та вдосконалюються алгоритми стиснення, які враховують специфіку різних типів даних і умови їх передачі.

Для підвищення ефективності стиснення даних у мережах 5G необхідно враховувати прогрес у розвитку новітніх технологій. Зокрема, застосування штучного інтелекту для створення інноваційних алгоритмів стиснення може значно покращити результативність процесу та зменшити енергоспоживання. Моделі машинного навчання здатні прогнозувати оптимальні параметри стиснення, що сприяє підвищенню продуктивності мережі та зниженню її навантаження.

Крім того, важливим є поєднання алгоритмів стиснення з іншими технологіями, спрямованими на підвищення енергоефективності. Наприклад, інтеграція методів стиснення з алгоритмами управління енергоспоживанням дає змогу досягти високого рівня економії енергії, зберігаючи при цьому продуктивність і якість наданих послуг у мережах 5G.

У порівнянні з попередніми поколіннями мобільних мереж, технологія 5G забезпечує значно вищу пропускну спроможність, що, однак, супроводжується зростанням енергоспоживання. Це зумовлено не лише збільшенням обсягів даних, що передаються, а й застосуванням передових технологій, таких як масивні MIMO (багатовходові багатовихідні системи) та міліметрові хвилі (mmWave), які потребують значних енергетичних ресурсів для роботи.

Ще одним важливим аспектом є висока щільність мережі 5G. Використання вищих частот вимагає встановлення значно більшої кількості базових станцій на одиницю площі. Як наслідок, зростає кількість пристроїв, що потребують електроживлення. Така ситуація може створювати виклики в густонаселених районах, наприклад у великих містах чи торговельних центрах, де може виникати нестача енергії для забезпечення функціонування всієї інфраструктури.

Для підвищення енергоефективності мереж 5G важливим є зниження енергоспоживання в умовах низького навантаження. Цей підхід передбачає автоматичне зменшення потужності роботи мережевого обладнання в періоди, коли попит на ресурси мережі є мінімальним. Для цього застосовуються сучасні

технології та наукові методи, які дозволяють оптимізувати енергоспоживання, не впливаючи негативно на якість наданих послуг.

Аналіз трафіку є першим важливим етапом у зниженні енергоспоживання при низькому навантаженні. Завдяки цьому аналізу можна виявити моменти, коли мережа зазнає мінімального навантаження, що дозволяє знизити потужність обладнання без шкоди для якості обслуговування. Алгоритми, які використовуються для аналізу, враховують не тільки пікові навантаження, а й сезонні чи добові коливання в мережевому трафіку, що дозволяє точно передбачити періоди, коли зменшення потужності буде доцільним.

Динамічне керування потужністю є важливим етапом у зниженні енергоспоживання мереж 5G. Алгоритми, що реалізують таке керування, дозволяють автоматично адаптувати потужність обладнання відповідно до поточного рівня трафіку. Це забезпечує ефективне використання енергетичних ресурсів, оскільки потужність знижується під час низького навантаження, що мінімізує енергоспоживання без шкоди для мережевого обслуговування. Врахування факторів, таких як час доби, сезонні зміни в трафіку та специфічні вимоги до якості обслуговування, дозволяє точно налаштувати рівень потужності та зробити мережу більш енергоефективною.

Також використання технологій економії енергії є важливим кроком для досягнення енергоефективності в мережах 5G. Режим очікування та режим низької потужності дозволяють значно зменшити споживання енергії без втрати якості обслуговування. Наприклад, базові станції можуть автоматично переходити в режим низької потужності в нічні години або в моменти, коли рівень трафіку знижується. Також можна вимикати неактивні компоненти мережі, зокрема підсистеми, які не обслуговують користувачів у цей час. Ці стратегії дозволяють значно знижувати енергоспоживання, не впливаючи на якість обслуговування в пікові моменти.

Оптимізація енергоспоживання в періоди низького навантаження приносить вагомі економічні та екологічні переваги. Зниження витрат електроенергії сприяє скороченню операційних витрат, що є ключовим для операторів мобільних мереж. Водночас зменшення енергоспоживання сприяє

скороченню викидів парникових газів, що позитивно позначається на стані довкілля та підтримує цілі сталого розвитку. Крім того, зменшення навантаження на обладнання мережі подовжує його експлуатаційний термін і підвищує надійність системи, оскільки зниження інтенсивності роботи зменшує ризику несправностей і перебоїв.

Дійсно, зменшення споживання енергії при низькому навантаженні має численні переваги, але й супроводжується певними викликами. Основним є досягнення балансу між економією енергії та підтримкою високої якості обслуговування користувачів. Зниження потужності має здійснюватися таким чином, щоб не виникали затримки чи перебої в роботі мережі, особливо під час раптових піків навантаження. Крім того, впровадження алгоритмів динамічного керування потужністю та технологій економії енергії є складним процесом, що вимагає значних інвестицій. Це включає не лише розробку та впровадження самих алгоритмів, але й їх інтеграцію в різноманітне обладнання мережі, що потребує стандартизації та сумісності між різними виробниками та технологіями.

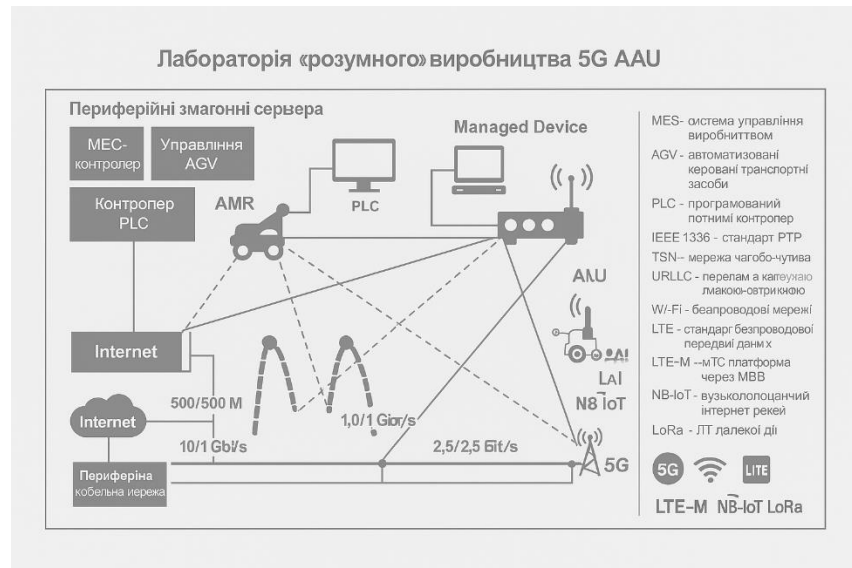


Рисунок 2.2 - Використання датської лабораторії "розумного" виробництва для вдосконалення 5G мереж із застосуванням штучного інтелекту та машинного навчання

Тому подальші дослідження та розвиток нових технологій у цій галузі є важливими для досягнення максимальної енергоефективності та стійкості мереж 5G без компромісів у якості послуг.

2.2 Оцінка потенціалу застосування відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної енергетики, для забезпечення енергоживлення інфраструктури мереж 5G

Проведення порівняльного аналізу основних типів відновлюваних джерел енергії — зокрема сонячної, вітрової та геотермальної — є важливою складовою сучасного енергетичного планування. Сонячна енергетика, що реалізується через використання фотоелектричних модулів, вирізняється низькими витратами на обслуговування, високою екологічністю та гнучкістю масштабування. Водночас, генерація енергії з вітру має певні недоліки, зокрема залежність від погодних умов, створення шумового навантаження, вплив на ландшафт і ризики для фауни, особливо птахів. Геотермальні установки забезпечують стабільне джерело енергії, однак потребують значних інвестицій у буріння та технічно доступні лише в певних географічних районах.

Розглянемо сонячну енергетику як один із перспективних напрямів відновлюваної енергії, яка ґрунтується на використанні фотоелектричних панелей для перетворення сонячного світла в електричну енергію. Серед її ключових переваг — відновлюваний характер джерела, відсутність шкідливих викидів в атмосферу, можливість гнучкого розміщення на різних поверхнях, а також мінімальні витрати на обслуговування в процесі експлуатації. Попри це, існують і певні обмеження, зокрема залежність ефективності від погодних умов, сезонність генерації та високі капітальні витрати на стартовому етапі. Завдяки своїй автономності та екологічності, ця технологія є привабливою для забезпечення електроживлення інфраструктурних об'єктів мереж 5G, сприяє децентралізації енергетичних систем та ефективно поєднується з рішеннями для зберігання енергії[8].

Таблиця 2.3 - Порівняльна характеристика ключових джерел альтернативної енергії

Характеристика	Сонячна енергія	Вітрова енергія	Геотермальна енергія
Джерело енергії	Енергія сонячного випромінювання	Кінетична енергія руху вітру	Теплова енергія, що надходить із надр Землі
Технологія	Фотоелектричні системи (сонячні панелі)	Вітрові турбіни	Геотермальні установки (електростанції)
Переваги	Необмежене природне джерело, екологічна безпека, модульність, низькі експлуатаційні витрати	Безмежне джерело, екологічно чисте, великий потенціал у певних регіонах	Постійне джерело енергії, незалежність від погодних факторів, стабільність виробництва
Недоліки	Чутливість до змін кліматичних умов, нестабільність вироблення енергії в різні пори року та значні початкові капіталовкладення є основними недоліками даного типу енергозабезпечення.	Функціонування вітрових електростанцій тісно пов'язане з наявністю відповідної швидкості вітру, що зумовлює нестабільність генерації; серед недоліків також відзначають акустичний дискомфорт, порушення ландшафтного вигляду та потенційну загрозу для орнітофауни.	Геотермальна енергія характеризується обмеженою доступністю в певних регіонах, високими витратами на буріння, а також існує ризик викидів парникових газів під час видобутку енергії.

## Продовження таблиці 2.3

Потенціал для 5G	Надання базовим станціям та іншим компонентам інфраструктури 5G можливості автономного електроживлення сприяє підвищенню енергонезалежності, підтримує децентралізовану модель енергопостачання та дозволяє мінімізувати втрати, що виникають під час транспортування електроенергії на великі відстані.	Застосування альтернативних джерел енергії дозволяє ефективно забезпечувати електроживлення базових станцій і центрів обробки даних, виконувати функцію резервного енергопостачання, а також може використовуватись для підтримки систем охолодження телекомунікаційного обладнання.	Використання відновлюваних джерел енергії забезпечує стабільне електроживлення для центрів обробки даних, сприяє ефективній організації систем опалення та кондиціонування приміщень, а також дозволяє зменшити навантаження на центральні електромережі.
------------------	--	--	---

Підсумовуючи, кожне з цих відновлюваних джерел енергії має свої сильні сторони та обмеження. Сонячна енергія вирізняється низькими експлуатаційними витратами та можливістю модульного встановлення, вітрова — здатністю працювати незалежно від зовнішніх умов, а геотермальна — стабільністю виробництва енергії. Потенціал цих джерел для застосування в мережах 5G полягає у їхній можливості забезпечувати енергопостачання базових станцій та інших складових інфраструктури, що сприяє децентралізації енергосистеми та знижує втрати при передачі електричної енергії.

Впровадження та використання сонячних панелей у телекомунікаційній сфері є важливим і перспективним напрямом розвитку на сьогодні. Тенденції, спрямовані на підвищення енергоефективності та поліпшення екологічних характеристик, спонукають компанії активно використовувати альтернативні джерела енергії, зокрема сонячні панелі, для забезпечення енергопостачання телекомунікаційних станцій. Ця ініціатива має численні переваги, але потребує ретельного аналізу і планування для оптимізації витрат і підвищення ефективності таких систем.

Переваги використання сонячних панелей для енергозабезпечення телекомунікаційних станцій мають велике значення з точки зору

енергоефективності. Однією з основних переваг є зменшення залежності від традиційних енергетичних джерел, таких як вугілля та природний газ. Сонячні панелі виробляють чисту електричну енергію, що сприяє зниженню викидів парникових газів і інших забруднюючих речовин. Крім того, надлишкова енергія може бути реалізована в загальну електромережу, що сприяє енергетичній незалежності та створенню можливостей для додаткових доходів від виробництва електроенергії.

Впровадження сонячних панелей для енергозабезпечення мереж пов'язане з певними викликами. Основною перешкодою є значні початкові витрати на встановлення панелей і налаштування супутніх систем, що може бути обтяжливим для деяких компаній. Крім того, ефективність генерації електроенергії залежить від погодних умов, що може призводити до нестабільності в обсягах доступної енергії. Для накопичення надлишкової енергії необхідні акумуляторні системи, що додатково збільшує витрати та вимагає виділення простору для їх розміщення.

Проте використання сонячних панелей має суттєві переваги, зокрема підвищення надійності енергетичних систем. Вони можуть виконувати функцію резервного джерела живлення під час збоїв у постачанні електроенергії, особливо у віддалених або важкодоступних регіонах, де створення традиційних електромереж є складним завданням. Це сприяє стабільності роботи мережі та її стійкості до зовнішніх впливів.

Для ефективного використання сонячних панелей необхідно ретельне планування перед їх установкою. Важливо провести оцінку енергогенеруючого потенціалу регіону, визначити потреби в електроенергії та проаналізувати доступні площі для монтажу. Також доцільно розглянути різні моделі фінансування, щоб зменшити вплив початкових витрат. Інтеграція сонячних панелей з акумуляторами та гібридними системами може значно підвищити ефективність і надійність енергетичної інфраструктури.

Сучасні енергоощадні підходи в мережах 5G як драйвер сталого розвитку. Розвиток мереж п'ятого покоління супроводжується пошуком нових рішень у сфері енергоефективності, що відкриває перспективи як для економіки, так і для

збереження довкілля. Одним із ключових чинників зниження витрат є інтеграція відновлюваних джерел енергії — таких як сонячні батареї, вітроустановки та інші екологічні технології. За підрахунками експертів, такий підхід дозволяє скоротити споживання традиційної електроенергії на 30–50%, що сприяє економії значних коштів у довгостроковій перспективі.

Ці заощадження створюють сприятливі умови для інвестицій у покращення інфраструктури, розширення покриття або зниження абонплати. Паралельно з цим урядові програми підтримки й фінансові стимули для компаній, що впроваджують альтернативну енергетику, роблять подібні рішення ще привабливішими для бізнесу.

Додатково варто зазначити, що використання екологічно чистих технологій підвищує репутацію компаній, демонструючи їхню відповідальність перед суспільством і навколишнім середовищем. Така практика не лише покращує імідж, а й посилює конкурентну позицію на ринку.

Насамкінець, інвестиції в енергоощадні технології стимулюють інноваційні процеси, сприяючи появі нових технологічних рішень та моделей ведення бізнесу, що зміцнює всю галузь у глобальному масштабі.

### Оцінка ефективності сонячної енергетики для живлення базових станцій 5G

Щоб визначити доцільність використання сонячної енергії для живлення інфраструктури мережі 5G, необхідно розрахувати потенціал генерації електроенергії сонячною панеллю. Потужність, яку може виробляти панель, визначається за формулою:

$$P_{panel} = \eta * A * G$$

де  $\eta$  — коефіцієнт ефективності сонячної панелі,  $A$  — площа панелі, а  $G$  — сонячна інсоляція. Наприклад, розрахуємо потужність для панелі площею  $10 \text{ м}^2$  і коефіцієнтом ефективності 15%, при середній інсоляції  $1500 \text{ Вт/м}^2$ :

Цей розрахунок дозволяє оцінити, наскільки енергія від сонячного випромінювання здатна покрити потреби базової станції. При оптимальних

умовах і правильно підбраному обладнанні, сонячна генерація може стати стабільним і економічно вигідним джерелом живлення.

$$P_{panel} = 0.15 \cdot 10 \cdot 1500 = 2250 \text{ Вт}$$

Таким чином, за середньої кількості сонячних годин на добу 5 годин, добова енергія, вироблена панеллю, буде:

$$E_{day} = P_{panel} \cdot t = 2250 \cdot 5 = 11\,250 \text{ Вт/год}$$

Для наочного аналізу візьмемо типовий сценарій встановлення сонячної енергосистеми на базовій станції мобільного зв'язку. Припустимо, що щомісячне споживання електроенергії становить 1000 кВт·год, а тариф на електроенергію дорівнює 4,32 грн за кВт·год. У такому випадку можна підрахувати щомісячні витрати на енергопостачання:

$$\frac{1500 \frac{\text{кВт}}{\text{год}}}{\text{місяць}} \times \frac{4,4 \text{ грн}}{\frac{\text{кВт}}{\text{год}}} = 6600 \text{ грн}$$

При щорічних витратах на електроенергію в розмірі 79 200 грн, встановлення сонячної енергосистеми, яка коштує 750 000 грн, виглядає як довгострокове вкладення з чітко прогнозованим ефектом. За умови повного покриття потреб у живленні, строк повернення інвестицій становить приблизно 9,4 року. Після цього періоду система почне приносити щорічну економію понад 70 тисяч гривень, що суттєво зменшить операційні витрати компанії та підвищить її фінансову стійкість [25].

У підсумку, інтеграція сучасних енергоощадних рішень у функціонування мереж п'ятого покоління відкриває широкі можливості для оптимізації витрат, підвищення фінансової ефективності та покращення екологічного іміджу компаній. Завдяки зменшенню енергозалежності та впровадженню інноваційних технологій забезпечується висока стабільність мережі та конкурентоспроможність. Це створює ґрунт для сталого розвитку телеком-інфраструктури та формує енергоефективне середовище, вигідне як для споживачів, так і для бізнесу.

### 2.3 Висновки до розділу 2

У ході дослідження, представленого в другому розділі під назвою «Передові підходи до підвищення енергоефективності в інфраструктурі 5G», було окреслено низку актуальних тенденцій і практичних рішень, які сприяють оптимізації енергоспоживання та ефективнішому функціонуванню мереж п'ятого покоління.

Дослідження встановило, що стрімке зростання обсягів даних у 5G-мережах неминуче спричиняє підвищення енергетичних витрат. Проте впровадження новітніх технологій, таких як антенні масиви МІМО, інтелектуальне керування спектральними ресурсами та енергоефективні протоколи зв'язку, дає змогу значно підвищити продуктивність мереж, одночасно знижуючи енергоспоживання. Ці рішення забезпечують баланс між високою пропускнуою здатністю та економією ресурсів, що є критично важливим для сучасних телекомунікаційних систем.

Окрему увагу приділено інтелектуальним алгоритмам керування ресурсами, які дозволяють адаптивно розподіляти навантаження й енергетичні потоки між вузлами мережі залежно від їхнього поточного стану та потреб трафіку. Такий підхід не лише оптимізує роботу мережі, але й сприяє значному підвищенню її енергоефективності, що має довгострокові економічні та екологічні переваги.

Крім того, перспективним напрямом є застосування аналітики великих даних для моніторингу й удосконалення роботи мережевих компонентів. Систематичний аналіз даних дає змогу виявляти неефективні процеси, мінімізувати надмірне споживання енергії та вдосконалювати стратегії енергоменеджменту. Завдяки цьому досягається не лише підвищення продуктивності мережі, але й значне зниження її впливу на довкілля, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку.

## 3 ПІДХОДИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ 5G - МЕРЕЖАХ

### 3.1 Особливості оптимізації енергоефективності в 5G – мережах

Зростаючий попит на мобільні дані та розширення мереж 5G призводять до значного збільшення енергоспоживання, що робить питання енергоефективності надзвичайно важливим для операторів мобільного зв'язку. Оскільки кількість користувачів та обсяг переданих даних продовжують зростати, забезпечення оптимального використання енергетичних ресурсів стає критичним завданням. Хоча технології 5G дозволяють досягати високих швидкостей і покращення надійності зв'язку, їх впровадження супроводжується значними витратами енергії[34, с. 5].

Енергоефективність мережі 5G можна оцінити за допомогою наступної формули:

$$EE = \frac{T}{E_{tot}}$$

де  $T$  — загальний обсяг переданих даних, а  $E_{tot}$  — загальна спожита енергія.

Наприклад, якщо мережа передає 1 Тбіт даних і споживає 1000 кВт·год енергії, енергоефективність буде:

$$EE = \frac{1 * 10^{12}}{1000 * 10^3 * 3600} \approx 277.78 \frac{\text{біт}}{\text{Дж}}$$

Однією з важливих технологій для зниження енергоспоживання в мережах 5G є використання beamforming. Ця методика дозволяє за допомогою масивів антен спрямовувати радіосигнал точно до користувачів або пристроїв. Замість того, щоб сигнал поширювався рівномірно в усіх напрямках, він передається тільки в бік, де знаходиться абонент. Це дозволяє зменшити витрати енергії на передачу сигналу і підвищити ефективність використання радіочастотного

спектру. Також, beamforming допомагає знижувати інтерференцію між сигналами від різних базових станцій, що сприяє додатковій економії енергії.

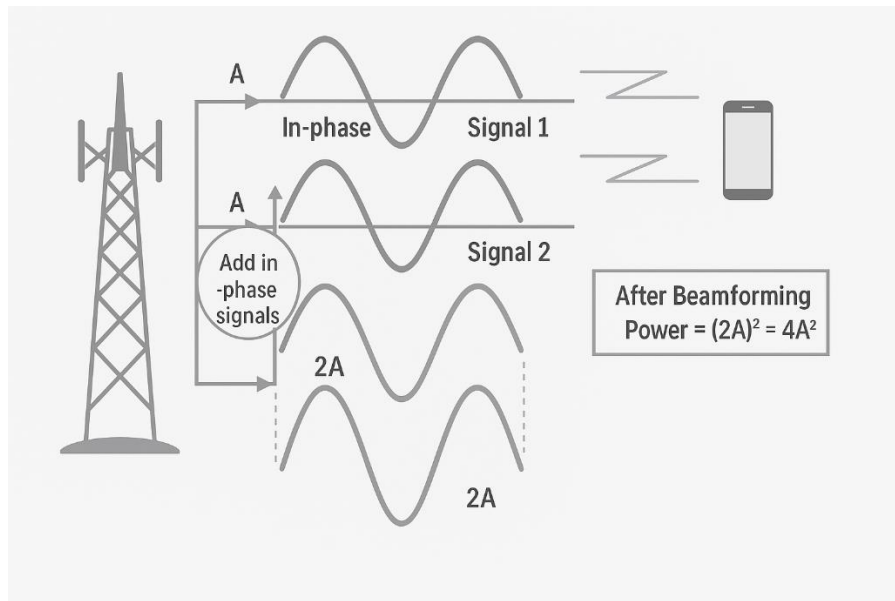


Рисунок 3.1 - Приклад застосування технології Beamforming

Технологія Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output) є ключовим елементом для підвищення енергоефективності у 5G мережах. Використання великої кількості антен на базових станціях дає змогу одночасно забезпечувати зв'язок з великою кількістю користувачів, що значно збільшує пропускну спроможність і покращує якість обслуговування. Застосування Massive MIMO дозволяє зменшити кількість необхідних базових станцій, що веде до суттєвого скорочення енергоспоживання мережі. Крім того, ця технологія сприяє більш гнучкому реагуванню на змінні умови навколишнього середовища, забезпечуючи раціональніше використання доступних ресурсів.

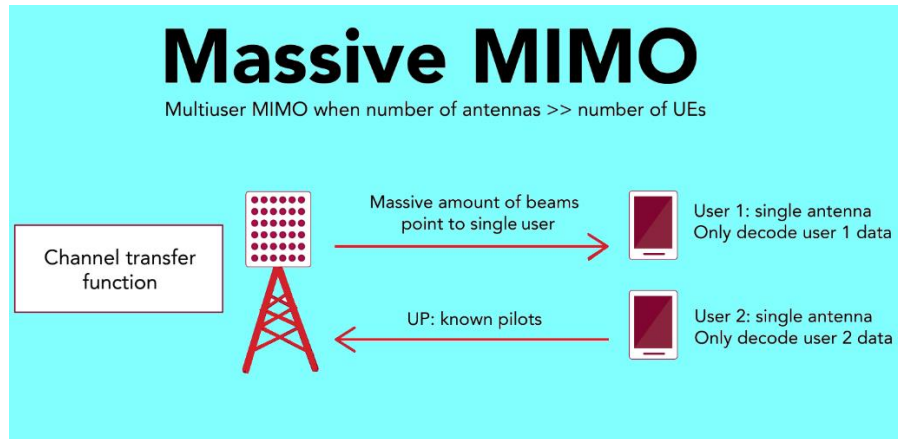


Рисунок 3.2 Massive MIMO (джерело:

<https://www.5gtechnologyworld.com/creating-5g-massive-mimo-part-1/>)

Окрім таких рішень, як beamforming і Massive MIMO, у 5G-мережах застосовуються й інші підходи для зниження енергоспоживання. Одним із них є впровадження режиму сну для кінцевих пристроїв. У моменти, коли пристрій не бере участі в передачі даних, він може автоматично переходити в енергозберігаючий режим, що суттєво зменшує його споживання електроенергії. Цей механізм є особливо корисним для пристроїв, які постійно підключені до мережі, зокрема сенсорів Інтернету речей (IoT) та інших малопотужних пристроїв[41].

Застосування віртуалізованих базових станцій є ще одним способом оптимізації енергоспоживання в мережах п'ятого покоління. Завдяки розгортанню таких станцій на базі програмного забезпечення можна скоротити потребу в фізичному обладнанні, що, у свою чергу, підвищує гнучкість керування мережею. Крім того, це сприяє більш ефективному використанню наявних ресурсів і зменшує витрати на технічне обслуговування та експлуатацію інфраструктури.

Технології beamforming і Massive MIMO мають вагомий вплив на підвищення енергоефективності в мережах 5G. Згідно з результатами досліджень, використання beamforming дозволяє скоротити енергоспоживання на 30–50%, тоді як застосування Massive MIMO може забезпечити зниження енергозатрат у межах 50–80%. Такий ефект досягається завдяки більш точному

спрямуванню сигналів, ефективному використанню частотного ресурсу, зменшенню рівня перешкод і покращенню якості зв'язку.[17]

Попри очевидні переваги, впровадження технологій beamforming і Massive MIMO супроводжується низкою складностей. Їх реалізація потребує високотехнологічного обладнання та розвиненого програмного забезпечення, що призводить до зростання витрат на запуск і підтримку мережевої інфраструктури. До того ж, для ефективного функціонування цих рішень необхідно постійно вдосконалювати алгоритми обробки сигналів і системи керування мережею

Попри наявні труднощі, активні наукові дослідження та технічні інновації сприяють підвищенню доступності та економічної доцільності впровадження beamforming і Massive MIMO. З урахуванням постійного зростання попиту на мобільний трафік і збільшення витрат на електроенергію, питання енергоефективності набуває особливої актуальності для операторів мобільного зв'язку. Використання згаданих технологій відкриває можливості суттєвого скорочення енергоспоживання в мережах п'ятого покоління, що допомагає операторам зменшити витрати та знизити шкідливий вплив на довкілля.

Крім уже згаданих аспектів, слід приділяти увагу енергоефективності на всіх стадіях життєвого циклу мережі 5G — від її проектування до повноцінної експлуатації та технічного обслуговування. На етапі планування важливо закладати можливість впровадження технологій, що сприяють зменшенню енергоспоживання, зокрема beamforming, Massive MIMO, режими сну для кінцевих пристроїв, регулювання потужності передавачів та використання віртуалізованих базових станцій. У процесі розгортання необхідно раціонально розміщувати антени та базові станції, щоб досягти максимальної ефективності у використанні енергетичних ресурсів.

Для оцінки та контролю енергоефективності мереж 5G застосовуються різноманітні методики та інструменти. Зокрема, існують спеціалізовані програмні засоби, які дозволяють здійснювати детальний аналіз енергоспоживання окремих елементів мережевої інфраструктури — таких як антени, базові станції та кінцеві пристрої. Завдяки цьому можна виявити основні

джерела надмірного споживання енергії та вжити заходів для підвищення ефективності їх роботи

Розширення покриття та зростання пропускної здатності мереж 5G призводить до суттєвого підвищення рівня енергоспоживання. Сучасні 5G-мережі обробляють великі обсяги даних і потребують високої швидкості передачі інформації, що, своєю чергою, збільшує навантаження на енергетичні ресурси. У зв'язку з цим впровадження систем керування енергоспоживанням (EMS) стає надзвичайно важливим для забезпечення енергоефективності та загальної стійкості мережі.

Система управління енергоспоживанням (EMS) представляє собою інтегроване програмне рішення, призначене для збору, обробки та контролю даних щодо енергетичних витрат у мережах 5G. Вона забезпечує автоматизоване регулювання навантаження на різні мережеві компоненти, зокрема базові станції, маршрутизатори та комутатори. Завдяки EMS можна гнучко налаштовувати споживання енергії в режимі реального часу відповідно до поточного мережевого трафіку, змін навколишнього середовища та інших факторів, що впливають на загальний рівень енергоефективності.

Однією з основних переваг EMS для мереж 5G є зниження витрат на енергоресурси. Завдяки оптимізації енергоспоживання, система EMS може значно зменшити витрати на енергоносії. Наприклад, це можна досягти шляхом зменшення потужності базових станцій під час періодів низького навантаження або автоматичного вимкнення непотрібних елементів під час високих навантажень. Такий підхід забезпечує суттєву економію протягом усього терміну експлуатації мережі. Крім того, зменшення енергоспоживання сприяє зниженню викидів парникових газів, що робить мережі 5G більш екологічно сталими. Це має велике значення на тлі зростаючої уваги до проблем зміни клімату та потреби знижувати вуглецевий слід у різних сферах діяльності

Переваги EMS виходять за межі економічних та екологічних аспектів. Система також сприяє підвищенню надійності мережі. Автоматичне реагування на відмови в електропостачанні та інші несподівані події дозволяє уникнути перебоїв у роботі та забезпечити стабільність навіть у критичних ситуаціях. Крім

того, EMS може покращити продуктивність мережі, оптимізуючи розподіл ресурсів. Наприклад, за допомогою динамічного перерозподілу навантаження між базовими станціями можна забезпечити рівномірний розподіл трафіку, що допомагає уникнути перевантаження окремих компонентів та покращує загальну ефективність мережі.

Основні функції EMS для мереж 5G охоплюють збори та аналіз даних, управління навантаженням і візуалізацію інформації. Збір даних здійснюється з різноманітних джерел, таких як базові станції, маршрутизатори, комутатори та інші елементи мережі. Отримані дані можуть включати показники споживання енергії, температуру навколишнього середовища, рівень мережевого трафіку та інші фактори, які впливають на ефективність енергоспоживання.

Аналіз даних є важливим етапом роботи EMS. Завдяки застосуванню сучасних алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту, система аналізує дані про енергоспоживання для виявлення певних патернів та тенденцій. Це дозволяє не лише оцінювати поточний стан мережі, а й прогнозувати майбутні потреби в енергії. На основі проведеного аналізу EMS може рекомендувати оптимальні стратегії для управління навантаженням та зменшення енергоспоживання[37].

Управління навантаженням є однією з ключових функцій EMS, що дозволяє автоматично регулювати навантаження на мережеві елементи з метою оптимізації енергоспоживання. Наприклад, під час низьких навантажень система може автоматично зменшувати потужність базових станцій або вимикати непотрібні компоненти. Водночас, під час пікових годин EMS може перерозподіляти навантаження між базовими станціями, щоб уникнути перевантаження окремих елементів мережі.

Візуалізація даних є важливим інструментом для користувачів EMS. Завдяки інтуїтивно зрозумілим графікам і діаграмам користувачі можуть стежити за енергоефективністю мережі та проводити її аналіз. Це дає змогу виявляти проблемні зони і приймати обґрунтовані рішення для поліпшення енергоефективності[39].

На ринку вже існують кілька прикладів EMS для мереж 5G. Одним із таких рішень є Ericsson Power Manager – EMS від компанії Ericsson, яке сприяє оптимізації енергоспоживання в мережах 5G. Це програмне забезпечення використовує передові алгоритми для автоматичного управління навантаженням на базові станції та інші мережеві компоненти, що дозволяє значно знижувати енергоспоживання. Інший приклад — Nokia NetAct Energy Manager, розроблений компанією Nokia, яке пропонує широкий набір інструментів для керування енергоспоживанням у мережах 5G. Це рішення включає функції для збору та аналізу даних, а також для автоматизованого регулювання навантаження. Huawei Intelligent Power Management System — це EMS від компанії Huawei, яке використовує штучний інтелект для оптимізації енергоспоживання в мережах 5G. Це програмне забезпечення дозволяє автоматично адаптуватися до змін навантаження та зовнішніх умов, що сприяє покращенню енергоефективності мережі.

### 3.2 Рекомендації з енергоефективності для мереж 5G

Зі стрімким збільшенням обсягів мобільного інтернет-трафіку та широким впровадженням технології 5G одним із найважливіших викликів для фахівців у телекомунікаційній галузі є пошук оптимального розміщення базових станцій. Від правильного вибору локацій для цих пристроїв залежить не лише покриття території і якість зв'язку, але й ефективність використання енергії всієї мережі. Ефективне планування інфраструктури дає змогу одночасно збільшити пропускну здатність та знизити загальне споживання електроенергії, що є ключовим аспектом сталого розвитку сучасних мереж зв'язку[38].

Одним з основних факторів, які визначають розташування базових станцій, є щільність користувачів. У районах з високою концентрацією населення, таких як міські центри, необхідно встановлювати більше базових станцій для забезпечення належної пропускну здатності та високої якості обслуговування. Висока щільність користувачів також призводить до

збільшення обсягу трафіку, що вимагає кращого покриття та більшої кількості каналів для передачі даних.

Тип навколишнього середовища має суттєвий вплив на процес вибору оптимального розташування базових станцій. У густозаселених міських зонах із численними висотними спорудами радіосигнали часто піддаються відбиттю або екрануванню, через що виникає необхідність збільшення кількості базових станцій для підтримки надійного покриття. Натомість у сільській місцевості, де переважають відкриті простори, радіохвилі можуть поширюватися на значно більші відстані, що дозволяє скоротити число встановлених базових станцій без втрати якості зв'язку.

Різноманітні перешкоди, такі як лісові масиви, гірські масиви та урбанізовані споруди, суттєво впливають на інтенсивність сигналів від базових станцій. Врахування цих факторів є надзвичайно важливим при виборі їх розташування. Зокрема, гористі ділянки та високі будівлі можуть створювати так звані «зони тіні», де сигнал практично не досягає кінцевого користувача. Вивчення рельєфу та розподілу штучних об'єктів на місцевості є обов'язковим етапом при плануванні розміщення мережевого обладнання.

Неможливо оминати увагою й питання забезпечення живлення базових станцій. Для стабільної роботи обладнання потрібно надійне електропостачання, тому зазвичай вибирають місця із зручним доступом до електромереж. Водночас, дедалі частіше застосовують альтернативні джерела енергії — сонячні панелі або вітроенергетичні установки, що зменшує залежність від традиційних постачальників електроенергії та позитивно впливає на загальну ефективність енергоспоживання.

Фінансові аспекти відіграють не менш важливу роль у процесі розгортання мереж. Вартість оренди або купівлі земельних ділянок, будівельних робіт та підключення до енергомережі може бути значною. Тому необхідно знаходити баланс між якістю покриття, енергоспоживанням та фінансовими витратами, щоб досягти оптимального функціонування мережі при мінімальних затратах.

Для визначення найкращих точок розміщення базових станцій використовують різноманітні методи оптимізації. Популярними є алгоритми, що

аналізують такі параметри, як щільність населення, особливості ландшафту, перешкоди на шляху сигналу та енергозабезпечення. Серед ефективних рішень — генетичні алгоритми та алгоритми рою часток, які дозволяють ітеративно знаходити найбільш оптимальні варіанти, покращуючи точність розрахунків.

Важливим етапом є також аналіз мережевого трафіку. Вивчення зон із підвищеним навантаженням або великим скупченням користувачів, що здійснюється як на основі історичних даних, так і в реальному часі, дає змогу планувати розміщення обладнання більш ефективно. Це дозволяє не лише покращити якість зв'язку, але й оптимізувати енергоспоживання.

Розумне розташування базових станцій має низку переваг: зменшення загального споживання енергії, скорочення кількості необхідних одиниць обладнання, зниження фінансових витрат та зменшення впливу на навколишнє середовище. Це стає особливо актуальним у світлі зростаючих енергетичних викликів та екологічних проблем.

Крім того, правильно сплановане покриття допомагає усунути «мертві зони» без сигналу, що покращує користувацький досвід і підвищує лояльність абонентів. Це відкриває операторам нові можливості для розширення клієнтської бази та збільшення доходів.

Ще одним позитивним ефектом є підвищення пропускної здатності мережі. Завдяки рівномірному розподілу навантаження прискорюється обробка даних, що особливо важливо при потоковому відео та інших сучасних сервісах, що потребують високої швидкості передачі інформації.

Важливою складовою підвищення енергоефективності є впровадження сучасних компонентів, таких як транзистори на основі нітриду галію (GaN) та карбїду кремнію (SiC). Вони мають кращі електричні й теплові характеристики, що дозволяє значно зменшити енергетичні втрати в порівнянні з традиційними кремнієвими пристроями.

Окрім цього, сучасне обладнання підтримує енергозберігаючі режими, які активуються під час низької активності мережі. Це дозволяє пристроям працювати в режимі мінімального споживання енергії, швидко повертаючись до повноцінного функціонування за потребою.

Важливою технологією є віртуалізація мережевих функцій (NFV), що переводить мережеві процеси у програмне забезпечення. Це дає можливість динамічно масштабувати ресурси, вимикати непотрібні сегменти та суттєво знижувати енергоспоживання.

Інтелектуальні системи управління енергією (ISUE), що використовують машинне навчання, здатні аналізувати мережевий трафік і прогнози навантаження для оптимального керування споживанням електроенергії. Вони дозволяють передбачати пікові навантаження та автоматично налаштовувати роботу мережі, забезпечуючи баланс між продуктивністю та енергозбереженням.

Таким чином, інтеграція енергоощадних технологій та інтелектуальних систем управління є ключовою умовою сталого розвитку мереж 5G. Вона сприяє зниженню експлуатаційних витрат, підвищенню надійності та зменшенню негативного впливу на довкілля, що відповідає світовим тенденціям до екологічної відповідальності.

### 3.3 Висновки до розділу 3

У третьому розділі дослідження було детально розглянуто різні методики та рекомендації щодо підвищення енергоефективності мереж п'ятого покоління. Це питання набуває особливої важливості у контексті модернізації телекомунікаційної інфраструктури, адже технології 5G відрізняються підвищеним споживанням електроенергії. Основною метою аналізу було визначення найбільш дієвих способів зниження енергетичних витрат, оптимізації роботи мережі та підвищення її загальної продуктивності.

Особливий акцент зроблено на впровадженні енергоощадного апаратного забезпечення. Дослідження висвітлює розробку високоефективних мікросхем, сучасних датчиків і передових систем охолодження, які значно скорочують енергоспоживання під час експлуатації обладнання. Важливу роль також відіграють принципи екологічного проектування інфраструктурних об'єктів і використання відновлюваних джерел енергії, що сприяють створенню сталішої та економічно вигідної мережевої екосистеми.

Крім того, значну увагу приділено розробці інтелектуальних систем моніторингу та управління енергоспоживанням. Такі системи включають спеціалізоване програмне забезпечення, яке в реальному часі аналізує продуктивність мережевого обладнання, виявляє неефективні процеси та автоматично оптимізує їх для мінімізації енергетичних витрат. Застосування цих технологій не лише знижує операційні витрати, але й забезпечує стабільну роботу мережі, підвищуючи її надійність і сприяючи зменшенню впливу на довкілля.

## ВИСНОВКИ

У процесі дослідження, присвяченого підвищенню енергоефективності мереж 5G, було проведено детальний аналіз ключових факторів, що сприяють оптимальному використанню енергетичних ресурсів. Основною метою роботи було визначення інноваційних стратегій і технологій, які забезпечують зниження енергоспоживання, подовження терміну експлуатації обладнання та зменшення викидів парникових газів, зберігаючи при цьому високу продуктивність мереж.

Одним із пріоритетних напрямів стало впровадження передових алгоритмів управління енергоспоживанням. Ці алгоритми дозволяють адаптивно регулювати роботу мережевих компонентів залежно від поточного рівня трафіку та потреб користувачів, що сприяє зниженню навантаження на обладнання та підвищенню ефективності використання ресурсів. Такий підхід забезпечує економію енергії без компромісів щодо якості зв'язку.

Значну увагу приділено розробці енергоощадного апаратного забезпечення, зокрема високоефективних мікросхем і модулів, які мінімізують енергетичні втрати в режимах низької активності та під час інтенсивної передачі даних. Ці рішення дозволяють оптимізувати роботу мережі, забезпечуючи її стабільність і довговічність.

Ключовим елементом дослідження стало використання інтелектуальних систем управління на основі аналізу великих даних (Big Data) та штучного інтелекту (AI). Такі системи забезпечують моніторинг у реальному часі, прогнозування пікових навантажень і автоматичну оптимізацію енергоспоживання. Це дозволяє не лише підвищити енергоефективність, але й швидко реагувати на будь-які неефективні процеси, зменшуючи операційні витрати.

Важливу роль відіграють також сучасні енергозберігаючі протоколи передачі даних і прогресивні мережеві архітектури. Вони забезпечують зниження енергетичних витрат під час комунікаційних процесів, зберігаючи

високу надійність і стабільність роботи мережі. Такі рішення створюють основу для ефективного функціонування 5G-систем у довгостроковій перспективі.

Підсумки дослідження підтверджують, що комплексне застосування зазначених технологій і підходів дозволяє значно підвищити енергоефективність мереж п'ятого покоління. Це не лише сприяє стабільній роботі телекомунікаційних систем, але й забезпечує зменшення екологічного впливу та зниження витрат операторів. Запропоновані рішення є важливим внеском у розвиток сучасних телекомунікацій, сприяючи створенню сталого, високопродуктивного та екологічно відповідального цифрового середовища.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мазепа К. М., Хвостик І. О., Аль-Вандаві Саїф Ахмед Іскандар Ісмаель. Аналіз методів енергоефективності в технології мобільного зв'язку 5G // Матеріали сьомої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку (EMC-2021)», Харків, ХНУРЕ, 2021. — С. 106–108.  
Анотація: Стаття досліджує сучасні методи підвищення енергоефективності 5G-мереж, зокрема через використання технологій МІМО та адаптивного управління спектром. Використано для обґрунтування вибору технологій оптимізації енергоспоживання в телекомунікаційних системах.
2. Шумков І. М. Дослідження ефективності методів територіального планування мереж мобільного зв'язку 5G : пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра, спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. — Харків, 2024. — 107 с.  
Анотація: Робота аналізує вплив територіального планування на енергоефективність 5G-мереж. Використано для оцінки стратегій розподілу ресурсів і їх впливу на продуктивність мережі.
3. Квятковський Д. В. Аналіз способів побудови бездротових 5G мереж на основі хмарних технологій : дипломна робота бакалавра, спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка. — Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. — 78 с.  
Анотація: Дослідження висвітлює потенціал хмарних технологій для зниження енергоспоживання в 5G. Використано для аналізу архітектурних рішень, що сприяють енергоефективності.
4. Хоменко М. І. Аналіз впливу ефекту Доплера на продуктивність 5G мереж : дипломна робота бакалавра, спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка. — Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. — 49 с.

Анотація: Робота досліджує вплив фізичних факторів, таких як ефект Доплера, на стабільність і енергоспоживання 5G-мереж. Використано для оцінки технічних викликів у реальних умовах.

5. Остапчук В. В. Методи машинного навчання у хмарних платформах для забезпечення ефективною передачею даних : пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра, спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. — Харків, 2024. — 78 с.

Анотація: Дослідження аналізує алгоритми машинного навчання для оптимізації передачі даних у 5G. Використано для вивчення інтелектуальних підходів до управління енергоспоживанням.

6. Mondal B. et al. 5G-NR (New Radio) CSI Computation Algorithm and Performance // 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 28–31 October 2018.

Анотація: Стаття розглядає алгоритми CSI для 5G-NR, які сприяють зниженню енергетичних витрат. Використано для аналізу технічних аспектів оптимізації мережевих протоколів.

7. Abdelkafi N., Bolla R., Lanting C. J., Rodriguez-Ascaso A., Thuns M., Wetterwald M. Understanding ICT standardization: Principles and practice. — 2019.

Анотація: Посібник розкриває стандарти телекомунікаційних технологій, включаючи аспекти енергоефективності. Використано для формування нормативної бази дослідження.

8. Mourtzis D., Angelopoulos J., Panopoulos N. Smart Manufacturing and Tactile Internet Based on 5G in Industry 4.0: Challenges, Applications and New Trends // Electronics. — 2021. — Vol. 10, no. 24. — P. 3175.

Анотація: Стаття аналізує роль 5G у розумному виробництві та тактильному інтернеті. Використано для оцінки перспективних застосувань 5G для енергоефективності.

9. Sharma S. et al. Key Enabling Technologies of 5G Wireless Mobile Communication // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 1817, no. 1. — P. 012003.

Анотація: Дослідження висвітлює ключові технології 5G, що сприяють зниженню енергоспоживання. Використано для аналізу технологічного фундаменту енергоефективних рішень.

10. Ramirez-Arroyo A. et al. Multilayer Network Optimization for 5G & 6G // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — P. 204.

Анотація: Стаття аналізує оптимізацію багатошарових мереж для 5G і 6G з акцентом на енергоефективність. Використано для оцінки перспективних мережевих архітектур.

11. Velez G. et al. 5G features and standards for vehicle data exploitation // Paper ID 256: 14th ITS European Congress, Toulouse, 30 May – 1 June 2022.

Анотація: Дослідження розглядає стандарти 5G для обробки даних у транспортних системах. Використано для аналізу енергоефективних рішень у V2X-комунікаціях.

12. Y. K. L. et al. Capacity Estimation for 5G Cellular Networks // Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT). — 2021. — Vol. 12, no. 3. — P. 45.

Анотація: Стаття аналізує пропускну здатність 5G-мереж із точки зору енергоспоживання. Використано для оцінки впливу мережевих параметрів на енергоефективність.

13. Aditya T. et al. NFV and SDN: A New Era of Network Agility and Flexibility // International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. — 2023. — P. 482–493.

Анотація: Дослідження розглядає роль NFV і SDN у підвищенні гнучкості 5G-мереж. Використано для аналізу програмно-визначених підходів до енергоменеджменту.

14. Wang D. et al. Effect of Retransmissions on the Performance of C-V2X Communication for 5G // 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall), Victoria, BC, Canada, 18 November – 16 December 2020.

Анотація: Стаття досліджує вплив повторних передач на продуктивність C-V2X у 5G. Використано для оцінки енергоефективності в транспортних комунікаціях.

15. Abdel Hakeem S. A., Hady A. A., Kim H. Optimizing 5G in V2X Communications // Research Anthology on Developing and Optimizing 5G Networks and the Impact on Society. — 2021. — P. 972–1011.

Анотація: Робота аналізує оптимізацію 5G для V2X-комунікацій із фокусом на енергоефективність. Використано для поглиблення розуміння транспортних застосувань.

16. Yachika, Kaur P., Garg R. A survey on key enabling technologies towards 5G // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021. — Vol. 1033. — P. 122.

Анотація: Огляд ключових технологій 5G, що сприяють зниженню енергоспоживання. Використано для аналізу сучасних тенденцій у телекомунікаціях.

17. Chataut R., Akl R. Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction // Sensors. — 2020. — Vol. 20, no. 10. — P. 2753.

Анотація: Стаття досліджує роль масивів MIMO у підвищенні енергоефективності 5G. Використано для аналізу апаратних рішень для мереж.

18. Elan Maulani I., Amalia Johansyah C. The Development of 5G Technology and Its Implications For The Industry // Devotion Journal of Community Service. — 2023. — Vol. 4, no. 2. — P. 631–635.

Анотація: Стаття розглядає вплив 5G на промисловість із акцентом на енергоефективність. Використано для оцінки практичних застосувань технології.

19. Malik S. et al. Implanting Intelligence in 5G Mobile Networks—A Practical Approach // Electronics. — 2022. — Vol. 11, no. 23. — P. 3933.

Анотація: Дослідження аналізує інтеграцію штучного інтелекту в 5G для оптимізації енергоспоживання. Використано для вивчення інтелектуальних систем управління.

20. Høyhtyä M., Apilo O., Lasanen M. Review of Latest Advances in 3GPP Standardization: D2D Communication in 5G Systems and Its Energy Consumption Models // *Future Internet*. — 2018. — Vol. 10, no. 1. — P. 3.  
Анотація: Стаття розглядає стандарти 3GPP для D2D-комунікацій у 5G. Використано для аналізу енергетичних моделей зв'язку.
21. Israr A. et al. Renewable energy powered sustainable 5G network infrastructure: Opportunities, challenges and perspectives // *Journal of Network and Computer Applications*. — 2021. — Vol. 175. — P. 100.  
Анотація: Дослідження аналізує використання відновлюваних джерел енергії для 5G. Використано для оцінки екологічних аспектів енергоефективності.
22. Watanabe A. O. et al. A Review of 5G Front-End Systems Package Integration // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. — 2020. — P. 1.  
Анотація: Стаття досліджує інтеграцію фронтальних систем 5G для зниження енергоспоживання. Використано для аналізу апаратних рішень.
23. Shreya Mane. 5G Communications & Networks // *International Journal of All Research Education and Scientific Methods (IJARESM)*. — 2022. — Vol. 10, no. 9. — P. 261–268.  
Анотація: Огляд технологій 5G із фокусом на енергоефективність. Використано для аналізу загальних характеристик мереж.
24. Belhadj S., Lakhdar A. M., Bendjillali R. I. Performance comparison of channel coding schemes for 5G massive machine type communications // *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. — 2021. — Vol. 22, no. 2. — P. 902.  
Анотація: Стаття порівнює схеми кодування каналів для 5G mMTC. Використано для оцінки їх впливу на енергоспоживання.
25. Bennis M., Debbah M., Poor H. V. Ultrareliable and low-latency wireless communication: Tail, risk, and scale // *Proceedings of the IEEE*. — 2018. — Vol. 106, no. 10. — P. 1834–1853.  
Анотація: Дослідження аналізує ультранадійні комунікації 5G із низькою затримкою. Використано для оцінки енергетичних вимог.

- 26.Lazar R.-G. et al. Real-time data measurement methodology to evaluate the 5G network performance indicators // *IEEE Access*. — 2023. — P. 1.  
Анотація: Стаття пропонує методи вимірювання продуктивності 5G у реальному часі. Використано для аналізу показників енергоефективності.
- 27.Lieira D. D. et al. Algorithm for 5G Resource Management Optimization in Edge Computing // *IEEE Latin America Transactions*. — 2021. — Vol. 19, no. 10. — P. 1772–1780.  
Анотація: Дослідження аналізує алгоритми управління ресурсами в 5G для хмарного обчислення. Використано для оцінки інтелектуальних рішень.
- 28.Hussain M., Rasheed H. Nonorthogonal Multiple Access for Next-Generation Mobile Networks: A Technical Aspect for Research Direction // *Wireless Communications and Mobile Computing*. — 2020. — Vol. 2020. — P. 1–17.  
Анотація: Стаття розглядає NOMA для 5G-мереж. Використано для аналізу технологій доступу та їх впливу на енергоефективність.
- 29.Ansari R. I. et al. 5G D2D Networks: Techniques, Challenges, and Future Prospects // *IEEE Systems Journal*. — 2018. — Vol. 12, no. 4. — P. 3970–3984.  
Анотація: Дослідження аналізує D2D-комунікації в 5G. Використано для оцінки їх потенціалу для зниження енергоспоживання.
- 30.Tomaszewski L., Kukliński S., Kołakowski R. A New Approach to 5G and MEC Integration // *Artificial Intelligence Applications and Innovations. AIAI 2020 IFIP WG 12.5 International Workshops*. — Cham, 2020. — P. 15–24.  
Анотація: Стаття пропонує нові підходи до інтеграції 5G і MEC. Використано для аналізу хмарних обчислень у контексті енергоефективності.
- 31.Prospects for the use of MIMO based on IEEE 802.11 ac in IoT // *National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»*, Випуск 4, 2020. — С. 126–131.  
Анотація: Стаття досліджує використання MIMO в IoT на базі стандартів 802.11ac. Використано для оцінки апаратних рішень для 5G.
- 32.Patel-Predd P. Update: Energy-efficient Ethernet // *IEEE Spectr*. — 2008. — Vol. 45. — P. 13.

Анотація: Стаття аналізує енергоефективні технології Ethernet. Використано для порівняння з мережевими рішеннями 5G.

- 33.Greenberg A., Hamilton J., Maltz D. A., Patel P. The cost of a cloud: Research problems in data center networks // ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev. — 2009. — Vol. 39. — P. 68–73.

Анотація: Дослідження розглядає енергетичні витрати хмарних дата-центрів. Використано для аналізу інфраструктури для 5G.

- 34.Carrega A., Singh S., Bruschi R., Bolla R. Traffic merging for energy-efficient datacenter networks // Proceedings of the SPECTS'12, Genoa, Italy, 8–11 July 2012. — P. 1–5.

Анотація: Стаття аналізує методи об'єднання трафіку для зниження енергоспоживання. Використано для оцінки дата-центрів у 5G.

- 35.Benson T., Akella A., Maltz D. Network traffic characteristics of data centers in the wild // Proceedings of the IMC'10, Melbourne, Australia, 1–3 November 2010. — P. 267–280.

Анотація: Дослідження аналізує характеристики трафіку в дата-центрах. Використано для оцінки впливу на 5G-мережі.

- 36.Abts D., Marty M., Wells P., Klausler P., Liu H. Energy proportional datacenter networks // Proceedings of the ISCA'10, Saint-Malo, France, 19–23 June 2010. — P. 338–347.

Анотація: Стаття пропонує пропорційні енергетичні рішення для дата-центрів. Використано для аналізу інфраструктури 5G.

- 37.Benson T., Akella A., Shaikh A., Sahu S. CloudNaaS: A cloud networking platform for enterprise applications // Proceedings of the SOCC'11, Cascais, Portugal, 26–28 October 2011. — No. 8. — P. 1–13.

Анотація: Дослідження аналізує хмарні платформи для корпоративних мереж. Використано для оцінки 5G-застосувань.

- 38.Al-Hazemi F., Peng Y., Youn C.-H., Lorincz J., Li C., Song G., Boutaba R. Dynamic allocation of power delivery paths in consolidated data centers based on adaptive UPS switching // Comput. Netw. — 2018. — Vol. 144. — P. 254–270.

Анотація: Стаття розглядає адаптивне перемикання ДБЖ для зниження енергоспоживання. Використано для аналізу дата-центрів у 5G.

39. Al-Hazemi F., Lorincz J., Mohammed A. F. Y., Salamh F. Reducing Data Center Power Losses through UPS Serial Consolidation // Proceedings of the SoftCOM 2019, Split, Croatia, 19–21 September 2019. — P. 1–6.

Анотація: Дослідження пропонує методи консолідації ДБЖ для енергоефективності. Використано для оцінки інфраструктури 5G.

40. Goiri I., Le K., Haque M. E., Beauchea R., Nguyen T. D., Guitart J., Torres J., Bianchini R. GreenSlot: Scheduling energy consumption in green datacenters // Proceedings of the SC'11, Seattle, WA, USA, 16 September 2011. — P. 1–11.

Анотація: Стаття аналізує планування енергоспоживання в дата-центрах. Використано для оцінки зелених технологій для 5G.

41. Wang L., Zhang F., Hou C., Aroca J. A., Liu Z. Incorporating rate adaptation into green networking for future data centers // Proceedings of the NCA'13, Cambridge, MA, USA, 22–24 August 2013. — P. 106–109.

Анотація: Дослідження пропонує адаптацію швидкості передачі для енергоефективності. Використано для аналізу дата-центрів у 5G.

42. Lu G., Zhang J., Wang H., Yuan L., Weng C. PowerTracer: Tracing requests in multi-tier services to diagnose energy inefficiency // Proceedings of the ICAC'12, San Jose, CA, USA, 18–20 September 2012. — P. 97–102.

Анотація: Стаття аналізує методи діагностики неефективного енергоспоживання. Використано для оцінки багатошарових сервісів у 5G.

43. Yeo S., Li H.-H. S. SimWare: A holistic warehouse-scale computer simulator // Computer. — 2012. — Vol. 45. — P. 48–55.

Анотація: Дослідження пропонує симулятор для аналізу енергоефективності дата-центрів. Використано для моделювання інфраструктури 5G.