

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

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра інформаційних технологій в телекомунікаціях

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедрою

_____ **Валерій ПРАВИЛО**

«_____» _____ **2026 р**

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інформаційно-комунікаційні
технології»**

спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

**на тему: Аналіз методів адаптивного керування конфігураціями базових
станцій 5G**

Виконав: здобувач вищої освіти 4 курсу, групи ТІ-21

Алянін Богдан Андрійович

Науковий керівник: директор НН ІТС,

доктор технічних наук, професор

Скулиш Марія Анатоліївна

Рецензент: професор кафедри ТК НН ІТС,

доктор технічних наук, професор Лисенко О.І.

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

Здобувач вищої освіти

Київ – 2026 року

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

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра інформаційних технологій в телекомунікаціях

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Освітньо-професійна програма «Інформаційно-комунікаційні технології»
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедрою

_____ Валерій ПРАВИЛО

«_____» _____ 2026 р

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Аляніну Богдану Андрійовичу

1. Тема дипломної роботи: Аналіз методів адаптивного керування конфігураціями базових станцій 5G, науковий керівник роботи директор НН ІТС, доктор технічних наук, професор Скулиш Марія Анатоліївна, затверджені наказом по університету від 26.05.2026 р. №1912-с.
2. Строк подання студентом дипломної роботи 02.06.2026 р.
3. Об'єкт дослідження: Процес управління енергоспоживанням в обладнанні мереж радіодоступу 5G (NG-RAN)
4. Вихідні дані до роботи: технічні специфікації архітектури 5G NR та систем Massive MIMO 64T64R, параметри енергоспоживання базової станції за методологією EARTH, гармонічна модель добового трафіку зі стохастичним шумом.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Проаналізувати архітектуру мереж 5G та енергетичні характеристики систем Massive MIMO. Дослідити механізми багаторівневих режимів сну. Розробити математичну модель добового профілю абонентського навантаження з урахуванням стохастичного шуму та часової нерівномірності трафіку. Програмно реалізувати адаптивний алгоритм динамічного керування станами gNodeB. Оцінити ефективність запропонованих рішень шляхом порівняльного аналізу показників енергозбереження та впливу апаратних затримок на якість обслуговування.
6. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): презентація - 13 слайдів, 9 рисунків.
7. Дата видачі завдання: 16.10.2025 р.

Календарний план

№ з/ п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів дипломної роботи	Примітка
1	Узгодження організаційних питань з науковим керівником	01.10.25-15.10.25	Виконано
2	Узгодження теми роботи та початок роботи над першим розділом	16.10.25-01.02.26	Виконано
3	Робота над першим та другим розділами	15.01.26-10.04.26	Виконано
4	Робота над третім розділом. Планування розробки власного рішення	08.04.26-10.05.26	Виконано
5	Оформлення дипломної роботи	17.05.26-01.06.26	Виконано
6	Підготовка презентації до захисту	20.05.26-08.06.26	Виконано

Здобувач вищої освіти _____ Богдан АЛЯНІН

Науковий керівник роботи _____ Марія СКУЛИШ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить 56 сторінок, 19 рисунків, 1 таблицю та 1 додаток, а також використовує 28 літературних джерел.

Актуальність теми: Стрімке розгортання мереж 5G та впровадження активних антенних систем Massive MIMO (зокрема конфігурацій 64T64R) призвело до того, що енергоспоживання базових станцій зросло у 2-3 рази порівняно з мережами попередніх поколінь. Понад 55% енергії витрачається радіочастотним блоком, який часто працює “вхолосту” в період низького абонентського навантаження. З огляду на тенденцію до дорожчання електроенергії та глобальний курс на “зелені комунікації”, розробка алгоритмів адаптивного керування енергоспоживанням телекомунікаційного обладнання адаптивного керування енергоспоживанням телекомунікаційного обладнання є критично важливою задачею.

Метою роботи є підвищення енергоефективності роботи мережі 5G з урахуванням нерівномірного розподілу користувачів в мережі радіодоступу.

Об'єктом дослідження є процес управління енергоспоживанням в обладнанні мереж радіодоступу 5G (NG-RAN).

Предметом дослідження є методи та алгоритми адаптивного перемикавання багаторівневих режимів сну (Advanced Sleep Modes) та керування антенними масивами Massive MIMO базової станції gNodeB.

Методами дослідження є методи математичного та імітаційного моделювання (для створення добового профілю абонентського навантаження), методи системного аналізу та теорії телекомунікаційних мереж (для оцінки якості обслуговування).

Результати дослідження дозволяють порівняти ефективність різних конфігурацій радіообладнання 5G в умовах нерівномірної щільності абонентів, виявити сильні та слабкі сторони багаторівневих режимів сну, а також проаналізувати доцільне застосування технології Beamforming для уникнення перевантажень мережі у години пік.

Основні отримані результати: У ході виконання робот було розроблено та програмно реалізовано алгоритм адаптивного керування базовою станцією gNodeB. Алгоритм динамічно перемикає обладнання між активним режимом із просторовим фокусуванням (Beamforming, 740 Вт) та багаторівневими режимами сну: легким (Light Sleep, 86 Вт) і глибоким (Deep Sleep, 7 Вт). Проведене імітаційне моделювання довело високу ефективність запропонованого рішення. Впровадження алгоритму дозволило знизити загально добове споживання електроенергії з 17.76 кВт*год (базовий сценарій без керування) до 12.13 кВт*год. Загальна економія енергоресурсів становить 31.7%. Крім того, за рахунок оптимізації порогових значень (перехід в активний стан при навантаженні понад 15 абонентів) вдалось мінімізувати вплив апаратних штрафних затримок (0.5 мс для легкого та 500 мс для глибокого сну) на мережу, що гарантує збереження нормативних показників якості обслуговування.

Ключові слова: МЕРЕЖІ 5G, БАЗОВА СТАНЦІЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, MASSIVE MIMO, АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ, РЕЖИМИ СНУ, ФОРМУВАННЯ ПРОМЕНІВ (BEAMFORMING), МОДЕЛЬ EARTH, ЯКІСТЬ ОБСЛУГОВУВАННЯ.

ABSTRACT

The thesis contains 56 pages, 19 figures, 1 table and 1 appendix, and also uses 28 literary sources.

Relevance of the topic: The rapid deployment of 5G networks and the introduction of active Massive MIMO antenna systems (in particular 64T64R configurations) has led to an increase in the energy consumption of base stations by 2-3 times compared to networks of previous generations. More than 55% of energy is consumed by the radio frequency unit, which often works “idle” during periods of low subscriber load. Given the trend towards higher electricity prices and the global course on “green communications”, the development of algorithms for adaptive energy management of telecommunications equipment is a critically important task.

The purpose of the work is to increase the energy efficiency of the 5G network, taking into account the uneven distribution of users in the radio access network.

The object of the study is the process of power consumption management in 5G radio access network (NG-RAN) equipment.

The subject of the study is methods and algorithms for adaptive switching of multi-level sleep modes (Advanced Sleep Modes) and control of Massive MIMO antenna arrays of the gNodeB base station.

The research methods are methods of mathematical and simulation modeling (to create a daily subscriber load profile), methods of system analysis and theory of telecommunication networks (to assess the quality of service).

The results of the study allow us to compare the effectiveness of different configurations of 5G radio equipment in conditions of uneven subscriber density, identify the strengths and weaknesses of multi-level sleep modes, and also analyze the appropriate use of Beamforming technology to avoid network overloads during peak hours.

The main results obtained: During the work, an algorithm for adaptive control of the gNodeB base station was developed and implemented in software. The algorithm dynamically switches the equipment between the active mode with spatial focus (Beamforming, 740 W) and multi-level sleep modes: light (Light Sleep, 86 W) and deep (Deep Sleep, 7 W). The simulation modeling proved the high efficiency of the proposed solution. The implementation of the algorithm allowed to reduce the total daily electricity consumption from 17.76 kWh (baseline scenario without control) to 12.13 kWh. The total energy savings are 31.7%. In addition, by optimizing the threshold values (transition to the active state when the load exceeds 15 subscribers), it was possible to minimize the impact of hardware penalty delays (0.5 ms for light sleep and 500 ms for deep sleep) on the network, which guarantees the preservation of regulatory quality of service indicators.

Keywords: 5G NETWORKS, BASE STATION, ENERGY EFFICIENCY, MASSIVE MIMO, ADAPTIVE CONTROL, SLEEP MODES, BEAMFORMING, EARTH MODEL, QUALITY OF SERVICE.

ЗМІСТ

СПИСОК ТЕРМІНІВ І СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ АРХІТЕКТУРИ ТА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МЕРЕЖ 5G	14
1.1 Огляд архітектури мережі радіодоступу 5G (gNB) та технології MassiveMIMO	14
1.2 Дослідження структури енергоспоживання базових станцій нового покоління	17
1.3 Аналіз існуючих методів енергозбереження: режими покращеного сну (Advanced Sleep Modes)	20
1.4 Вплив нерівномірного розподілу користувачів на ефективність мережі	23
1.5 Висновки	25
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ КОНФІГУРАЦІЄЮ gNB	27
2.1 Моделювання динамічного навантаження мережі (профілі трафіку)	27
2.2 Опис математичної моделі енергоспоживання EARTH	29
2.3 Алгоритм адаптивного перемикавання режимів сну в комбінації з Beamforming	33
2.4 Оцінка компромісу (trade-off) між енергоефективністю та затримками зв'язку	37
2.5 Висновки	38
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ	39
3.1 Обґрунтування вибору мови Python та бібліотек для моделювання	39
3.2 Розробка структури імітаційної моделі та опис логіки класів	40
3.3 Результати моделювання: аналіз добових графіків енергоспоживання	43
3.4 Оцінка компромісу (trade-off) між енергоефективністю та затримками зв'язку	45
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	47
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	49
ДОДАТОК А	52

СПИСОК ТЕРМІНІВ І СКОРОЧЕНЬ

3GPP (3rd Generation Partnership Project) — консорціум з розробки специфікацій для мобільної телефонії.

4G / 5G (Fourth / Fifth Generation) — четверте / п'яте покоління систем мобільного зв'язку.

ASM (Advanced Sleep Modes) — покращені режими сну (багатоступеневі режими енергозбереження базової станції).

BBU (Baseband Unit) — блок обробки цифрових (базових) сигналів.

CU (Centralized Unit) — централізований пристрій базової станції.

DTX (Discontinuous Transmission) — переривчаста передача даних.

DU (Distributed Unit) — розподілений пристрій базової станції.

EARTH (Energy Aware Radio and NeTwork TecHnologies) — еталонна модель оцінки енергоспоживання радіомереж.

ETSI (European Telecommunications Standards Institute) — Європейський інститут телекомунікаційних стандартів.

gNB (Next Generation Node B) — базова станція мережі 5G (NG-RAN).

IDE (Integrated Development Environment) — інтегроване середовище розробки програмного забезпечення.

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) — Інститут інженерів з електротехніки та електроніки.

MIMO (Multiple Input Multiple Output) — технологія просторового кодування сигналу (багатоканальний вхід — багатоканальний вихід).

Massive MIMO — масивні системи MIMO (використання великої кількості антенних елементів).

NG-RAN (Next Generation Radio Access Network) — мережа радіодоступу наступного покоління (5G).

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) — мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів.

PA (Power Amplifier) — підсилювач потужності радіосигналу.

QoS (Quality of Service) — якість обслуговування (показники швидкодії та надійності мережі).

RF (Radio Frequency) — радіочастотний тракт.

RU (Radio Unit) — радіочастотний блок базової станції.

SM (Sleep Mode) — режим сну (SM1, SM2, SM3, SM4 — рівні глибини вимкнення компонентів).

SSB (Synchronization Signal Block) — блок сигналів синхронізації та мовлення.

UE (User Equipment) — пристрій користувача (абонентський термінал, смартфон).

ГНН — години найбільшого навантаження.

ООП — об'єктно-орієнтоване програмування.

ВСТУП

Сучасний етап розвитку глобального інформаційного суспільства характеризується стрімким розгортанням та еволюцією мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G New Radio). Технологія 5G є технологічним фундаментом для цифрової трансформації промисловості, розвитку концепцій «розумних міст» (Smart City), Інтернету речей (IoT) та безпілотного транспорту. Завдяки впровадженню широкосмугових антенних систем Massive MIMO, мережі 5G здатні забезпечити терабітні швидкості передачі даних та наднизькі затримки.

Проте, масштабне розгортання інфраструктури 5G зіштовхнулося із серйозним екологічним та економічним викликом — критичним зростанням енергоспоживання. Як зазначено у звіті Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ / ITU): *«Цифрова інфраструктура майбутнього має розвиватися в раціональній гармонії з глобальними цілями сталого розвитку, де енергетична ефективність телекомунікаційних систем стає таким самим критичним критерієм якості мережі, як і її пропускна здатність»* [16]. За оцінками асоціації GSMA, витрати на електроенергію складають від 20% до 40% усіх операційних витрат (OPEX) мобільних операторів, і з впровадженням 5G цей показник тенденційно зростає, оскільки одна базова станція gNodeB споживає у 2–3 рази більше енергії порівняно з обладнанням 4G/LTE [14].

Аналіз архітектури систем радіодоступу (NG-RAN) показує, що понад 55% усього енергоспоживання припадає на радіоблок (Radio Unit), який функціонує в режимі максимальної потужності навіть у періоди низької активності абонентів. У межах авторитетного європейського дослідницького проєкту EARTH (Energy Aware Radio and NeTwork Technologies) було доведено, що робота телекомунікаційного обладнання «вхолосту» (за відсутності корисного трафіку) є головним джерелом енергетичних втрат

галузі [9]. Це зумовило формування нової науково-технічної парадигми — «зелених комунікацій» (Green Communications).

Однією з найбільш перспективних стратегій розв'язання цієї проблеми, зафіксованої у стандартах 3GPP, є впровадження багаторівневих режимів сну (Advanced Sleep Modes) та динамічного просторового фокусування (Beamforming). Проте, пряме або неконтрольоване відключення апаратних компонентів базової станції викликає штрафні затримки на їхнє повторне пробудження та ресинхронізацію, що може призвести до деградації якості обслуговування (QoS) та втрати пакетів даних.

Метою роботи є підвищення енергоефективності роботи мережі 5G з урахуванням нерівномірного розподілу користувачів в мережі радіодоступу.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані та вирішені наступні задачі:

- 1) Проаналізувати архітектуру мережі 5G та енергетичні характеристики систем Massive MIMO.
- 2) Дослідити механізми багаторівневих режимів сну базових станцій.
- 3) Розробити математичну модель добового профілю абонентського навантаження.
- 4) Програмно реалізувати адаптивний алгоритм динамічного керування станами gNodeB.
- 5) Провести аналіз ефективності запропонованих рішень.

Об'єктом дослідження є процес управління енергоспоживанням в обладнанні мереж радіодоступу 5G (NG-RAN).

Предметом дослідження є методи та алгоритми адаптивного перемикання багаторівневих режимів сну (Advanced Sleep Modes) та керування антенними масивами Massive MIMO базової станції gNodeB.

Методами дослідження є методи математичного та імітаційного моделювання (для створення добового профілю абонентського навантаження), методи системного аналізу та теорії телекомунікаційних мереж (для оцінки якості обслуговування).

Результати дослідження дозволяють порівняти ефективність різних конфігурацій радіобладнання 5G в умовах нерівномірної щільності абонентів, виявити сильні та слабкі сторони багаторівневих режимів сну, а також проаналізувати доцільне застосування технології Beamforming для уникнення перевантажень мережі у години пік.

Елементом новизни є удосконалення алгоритму динамічного керування енергоспоживання базових станцій 5G шляхом комплексного застосування багаторівневих режимів сну та технології просторового фокусування. На відміну від існуючих рішень, перемикання станів відбувається на основі розробленої стахостичної моделі добового навантаження з урахуванням штрафних апаратних затримок переходу між станами (за методологією EARTH).

Практичне значення полягає у можливості безпосереднього використання розробленого алгоритму та програмного забезпечення операторами мобільного зв'язку для оптимізації конфігурацій мереж 5G. Впровадження запропонованих рішень дозволить суттєво скоротити операційні витрати на електроенергію та подовжити термін експлуатації радіобладнання.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ АРХІТЕКТУРИ ТА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МЕРЕЖ 5G

Сучасні мобільні системи зв'язку стрімко розвиваються, щоб забезпечувати надвисоку швидкість передачі даних та стабільне покриття. Впровадження мереж нового покоління (5G) кардинально змінює такі галузі, як промисловість, транспорт і повсякденне життя, вимагаючи безперервної обробки величезних масивів інформації. Проте, разом із розширенням можливостей телекомунікаційної інфраструктури, критично зростає її загальне енергоспоживання.

1.1 Огляд архітектури мережі радіодоступу 5G (gNB) та технології Massive MIMO

Стрімке зростання обсягів мобільного трафіку та вимог до пропускної здатності зумовило перехід телекомунікаційної індустрії до стандарту п'ятого покоління (5G). На відміну від попередніх стандартів, мережа радіодоступу наступного покоління (NG-RAN — Next Generation Radio Access Network) будується на принципах гнучкості, масштабованості та віртуалізації мережевих функцій. Згідно з базовими специфікаціями консорціуму 3GPP, ключовим елементом NG-RAN є базова станція нового типу, яка отримала назву **gNodeB (gNB)** [2].

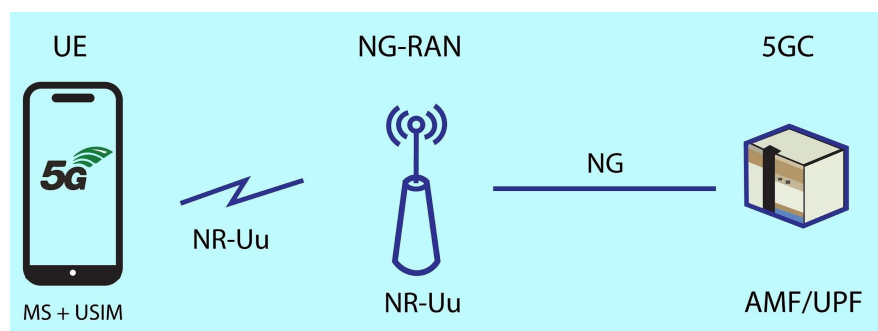


Рисунок 1.1 - Загальна архітектура мережі 5G (зв'язок між ядром мережі 5GC та базовими станціями gNB)

Фундаментальною відмінністю gNB від базових станцій попередніх поколінь (eNodeB у мережах 4G) є можливість розділення її архітектури на логічні блоки. Такий підхід дозволяє операторам гнучко розподіляти обчислювальні ресурси та оптимізувати роботу мережі залежно від щільності абонентів у конкретній географічній зоні.

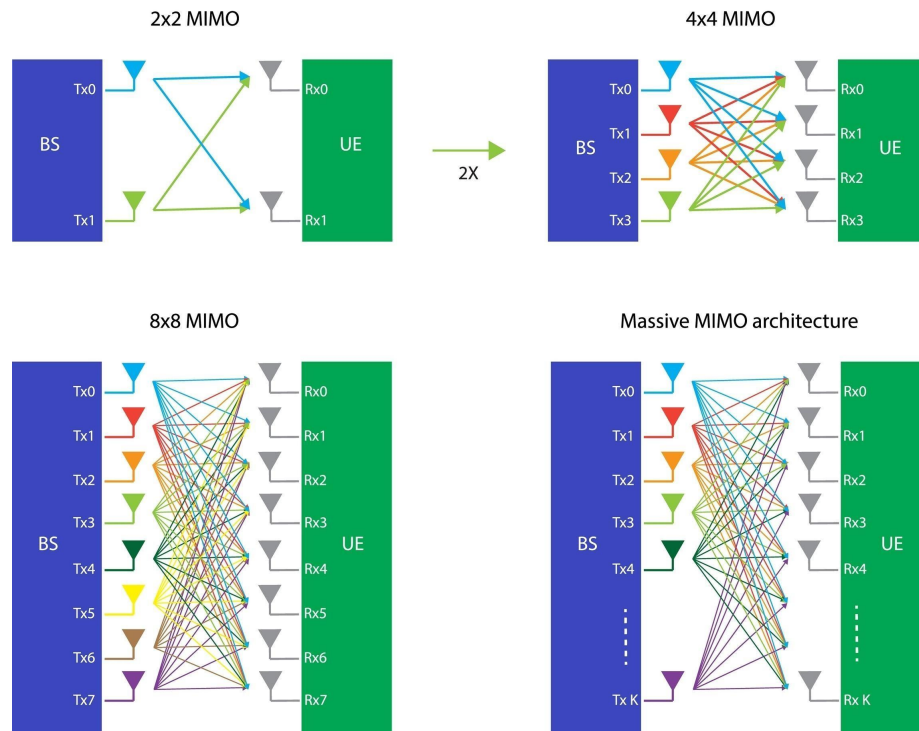


Рисунок 1.2 - Схема декомпозиції gNB на блоки CU та DU

Для забезпечення цільових показників швидкості передачі даних, мережі 5G критично залежать від використання технології багатоантенних систем — **Massive MIMO**. Якщо традиційні базові станції використовували від 2 до 8 антенних елементів, то системи Massive MIMO оперують десятками або сотнями активних антен (наприклад, конфігурації 64x64 або 128x128), які працюють одночасно на тих самих частотних і часових ресурсах [5].

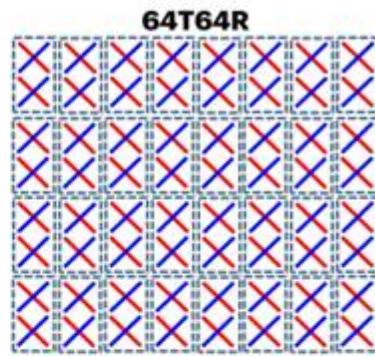


Рисунок 1.3 - Візуалізація антенної решітки Massive MIMO (панель 64x64)

Головною перевагою багатоантенних решіток Massive MIMO є підтримка технології просторового фокусування сигналу — **Beamforming** (формування променя). Традиційні секторні антени випромінюють радіосигнал у широкому просторовому куті, незалежно від того, де саме знаходиться користувач. Це призводить до значного розсіювання електромагнітної енергії в просторі. Натомість Beamforming дозволяє базовій станції динамічно формувати вузькоспрямовані промені, які передають сигнал безпосередньо до активного пристрою користувача (User Equipment, UE) [12]. Завдяки цьому суттєво підвищується рівень сигналу на стороні приймача та мінімізується внутрішньосистемна інтерференція [21].

Проте впровадження архітектури gNB спільно з активними антенними системами Massive MIMO має суттєвий недолік — стрімке зростання енергоспоживання. Кожен елемент масиву антен вимагає наявності власного радіочастотного тракту (RF chain), який включає цифро-аналогові перетворювачі, фільтри та підсилювачі потужності (Power Amplifiers) [4]. За аналітичними даними GSMA, енергоспоживання типової базової станції 5G під максимальним навантаженням може бути у 3–4 рази вищим порівняно зі станцією стандарту 4G/LTE [13]. Особливо критичною ця проблема стає в години спаду абонентського трафіку (наприклад, у нічний час), коли базова станція продовжує споживати значну частину енергії на підтримку активного

стану блоків обробки сигналів та радіочастотних трактів навіть за відсутності активних передач [20].

Таким чином, архітектура сучасних мереж 5G забезпечує безпрецедентну пропускну здатність завдяки Massive MIMO та Beamforming, але водночас формує нагальну науково-технічну проблему оптимізації енергоспоживання вузлів gNB в умовах нерівномірного розподілу трафіку.

1.2 Дослідження структури енергоспоживання базових станцій нового покоління

Для розробки ефективних методів енергозбереження необхідно детально проаналізувати, на які саме компоненти базової станції gNB витрачається найбільша частка електроенергії. Структура енергоспоживання сучасного вузла зв'язку є комплексною і залежить від архітектурної конфігурації (кількості антенних елементів, смуги частот та обчислювальної потужності).

Згідно з еталонною моделлю енергоспоживання EARTH (Energy Aware Radio and NeTwork TecHnologies), загальну потужність, яку споживає базова станція, можна розділити на два основні блоки: радіочастотну частину (Radio Unit, RU) та блок обробки цифрових сигналів (Baseband Unit, BBU).

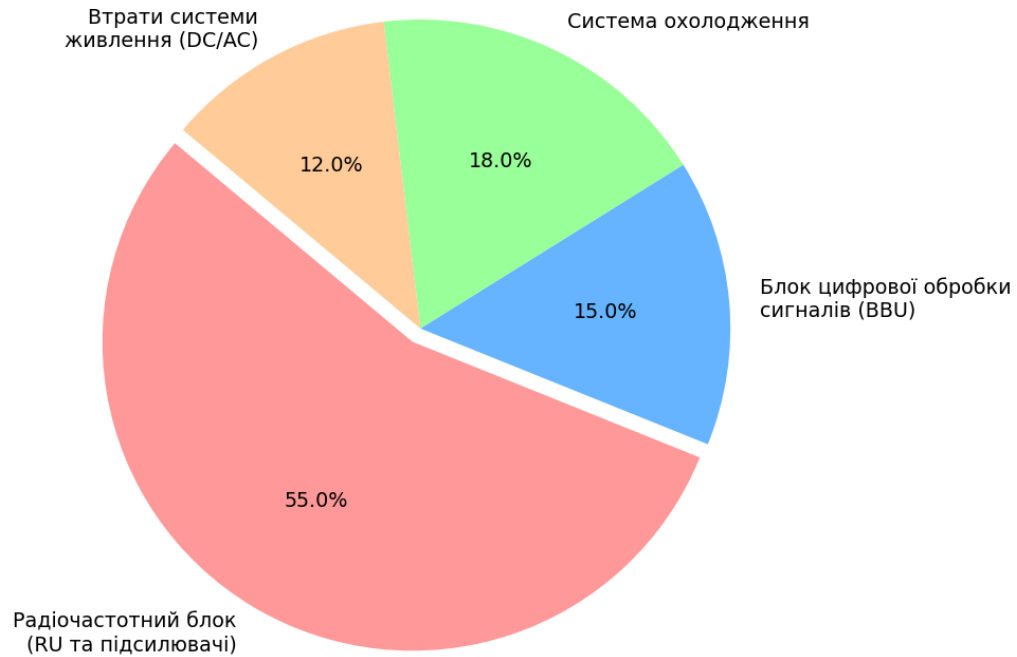


Рисунок 1.4 - Складові блоки енергоспоживання gNB

Найбільш енергоємним компонентом у складі RU є підсилювач потужності (Power Amplifier, PA). Його основне завдання — посилення радіосигналу перед передачею в антену для забезпечення необхідного покриття. Ефективність сучасних підсилювачів залишається відносно низькою: значна частина енергії (до 50–60%) розсіюється у вигляді тепла, що потребує додаткових витрат на роботу систем охолодження [7]. Впровадження технології Massive MIMO, яка передбачає використання великої кількості малопотужних підсилювачів для кожного антенного елемента, лише ускладнює цю структуру.

Блок обробки цифрових сигналів (BBU) відповідає за виконання складних математичних операцій: кодування, модуляцію, швидке перетворення Фур'є та обчислення ваг для формування променів (Beamforming). Енергоспоживання BBU значною мірою залежить від обсягу трафіку, але навіть за його відсутності блок потребує значної потужності для підтримки системних функцій та синхронізації мережі [18].

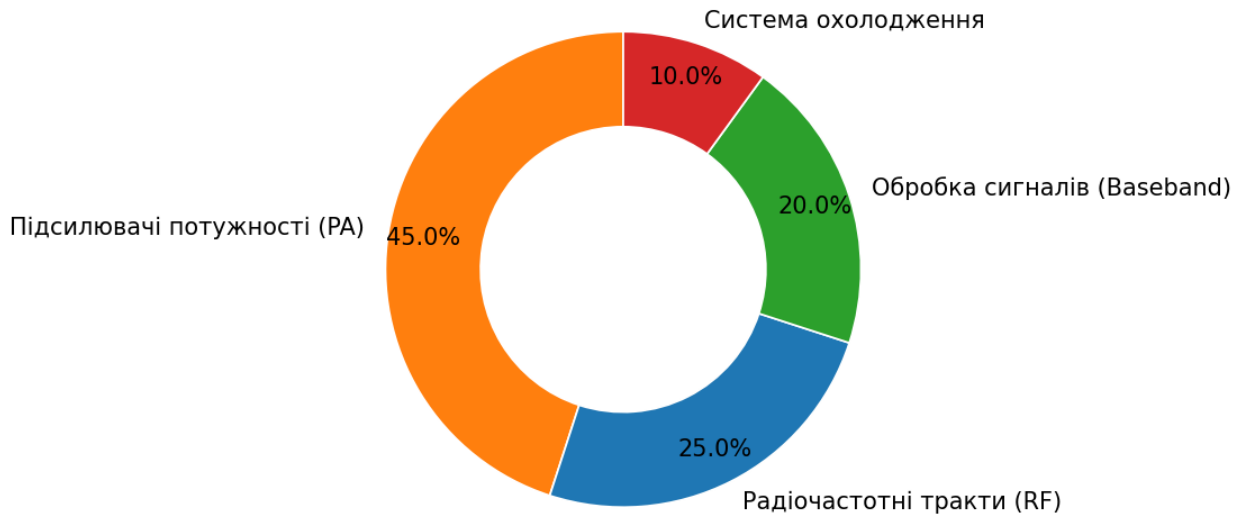


Рисунок 1.5 - Діаграма розподілу споживаної потужності між PA, RF-трактами, Baseband та системою охолодження

Важливою характеристикою енергоспоживання gNB є наявність так званого «базового» або статичного споживання. Це потужність, яку станція витрачає на підтримку своєї працездатності, незалежно від того, чи передаються в цей момент дані користувачу [26]. У мережах 5G статична частка споживання є значно вищою, ніж у попередніх поколіннях, через необхідність живлення складних обчислювальних платформ та активних антенних масивів.

Як зазначається в дослідженнях моделі EARTH, сумарне споживання енергії P може бути описане лінійною залежністю від відносного навантаження трафіку:

$$P_{in} = N_{TRX} * (P_0 + \Delta_p * P_{out}), 0 \leq P_{out} \leq P_{max} \quad (1.1)$$

де N_{TRX} - кількість активних приймально-передавальних модулів;

P_0 - статичне споживання одного модуля;

Δ_p - коефіцієнт зростання потужності залежно від вихідного сигналу

P_{out}

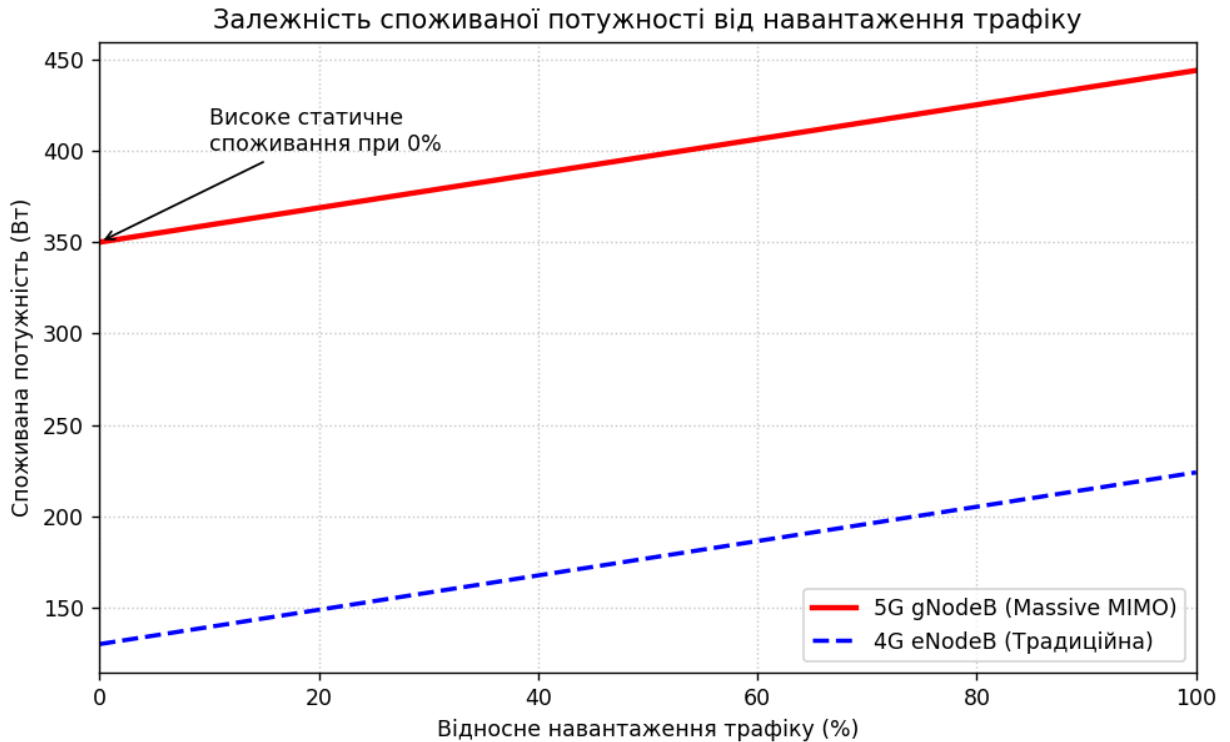


Рисунок 1.6 - Графік залежності споживаної потужності від рівня навантаження трафіку для різних типів базових станцій

Отже, аналіз структури споживання показує, що найбільш перспективним шляхом підвищення енергоефективності є мінімізація статичних витрат у періоди низького навантаження. Це може бути досягнуто шляхом тимчасового вимкнення підсилювачів потужності та окремих блоків обробки сигналів, що є основою концепції режимів сну (Sleep Modes).

1.3 Аналіз існуючих методів енергозбереження: режими покращеного сну (Advanced Sleep Modes)

Концепція режимів сну (Sleep Modes) є одним із найбільш ефективних підходів до зниження енергоспоживання в мережах 5G NR. Основна ідея полягає в динамічному вимкненні апаратних компонентів базової станції в

періоди, коли передача даних не відбувається. Це дозволяє суттєво зменшити статичне енергоспоживання, яке складає значну частку загальних витрат вузла gNB.

Згідно з еталонною моделлю моделювання енергоспоживання (EARTH) та технічними звітами 3GPP, виділяють чотири рівні покращених режимів сну (Advanced Sleep Modes — ASM), які відрізняються глибиною вимкнення компонентів та часом, необхідним для повернення в активний стан.

1. **Мікро-сон (SM1):** Найбільш динамічний режим, що реалізується на рівні окремих символів OFDM. Він передбачає вимкнення лише підсилювача потужності в коротких паузах між символами передачі. Час активації та пробудження є мінімальним і становить приблизно 35.5 мкс.
2. **Легкий сон (SM2):** Передбачає вимкнення більшої кількості радіочастотних блоків (фільтрів, змішувачів). Активація відбувається, коли пауза в трафіку перевищує 1 мс. Час пробудження для цього режиму складає 0.5 мс.
3. **Глибокий сон (SM3):** На цьому рівні вимикаються не тільки радіоблоки, а й частина обчислювальних ресурсів блоку Baseband. Це забезпечує значну економію, проте час пробудження зростає до 5–10 мс.
4. **Надглибокий сон (SM4):** Стан максимальної енергоефективності, за якого активними залишаються лише блоки синхронізації та мережеві інтерфейси для отримання сигналів пробудження. Час відновлення роботи в такому режимі може досягати від 0.5 до 1 с.

Таблиця 1.1

Рівень сну	Тривалість деактивації	Мінімальна тривалість сну	Тривалість активації
SM1	35,5 мкс	71 мкс	35,5 мкс
SM2	0,5 мс	1 мс	0,5 мс
SM3	5 мс	10 мс	5 мс
SM4	0,5 с	1 с	0,5 с

Реалізація цих режимів базується на технології переривчастої передачі (Discontinuous Transmission, DTX). Глибші режими сну забезпечують вищу економію енергії, але водночас створюють додаткові затримки (latency) через необхідність «розігріву» апаратної частини.

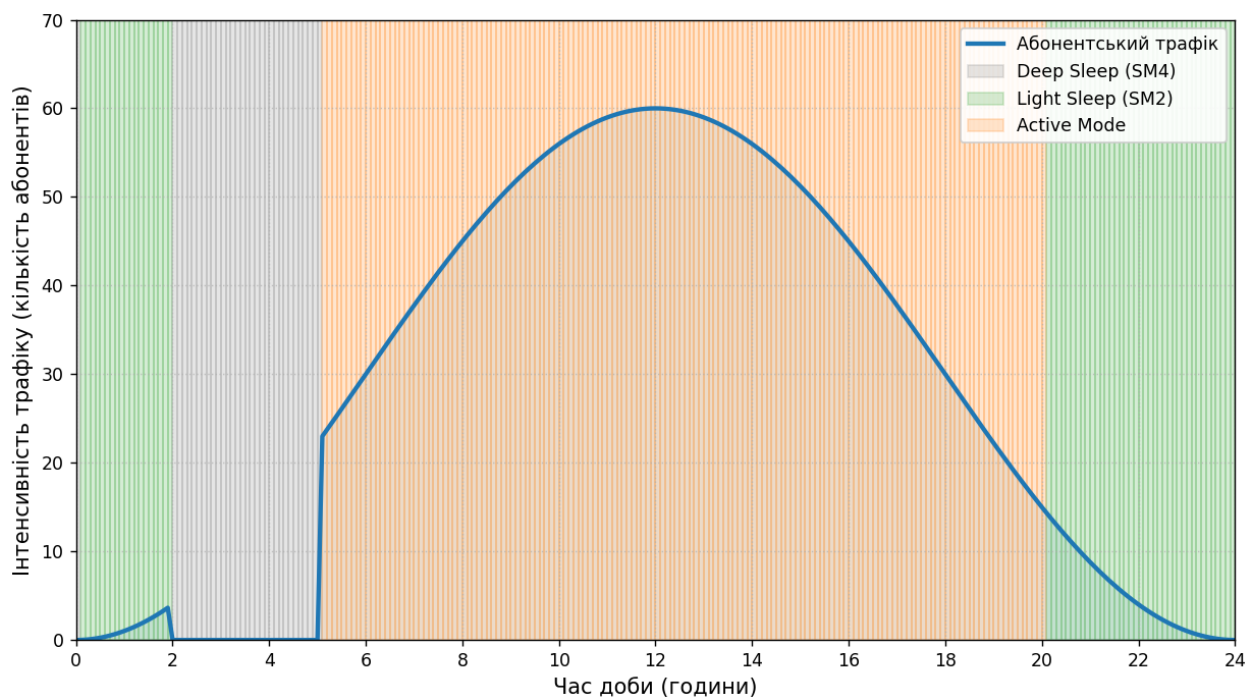


Рисунок 1.7 - Часова діаграма перемикання станів gNB між активним режимом та рівнями ASM залежно від інтенсивності вхідного трафіку

Вибір оптимального сну є складною задачею. Помилкове переведення станції в занадто глибокий сон за умови швидкої появи нових абонентів може

призвести до порушення цільових показників якості обслуговування (QoS). Наприклад, використання технології Beamforming дозволяє більш виважено підходити до вимкнення окремих ресурсів антеної решітки Massive MIMO, не погіршуючи при цьому якість сигналу для активних користувачів [12].

Узагальнюючи, впровадження ASM дозволяє змінити основний принцип роботи мереж 5G з моделі «завжди включено» (always on) у модель «завжди доступно» (always available), що є критично важливим для екологічної та економічної стійкості сучасних операторів зв'язку.

1.4 Вплив нерівномірного розподілу користувачів на ефективність мережі

Характерною особливістю сучасних стільникових мереж є суттєва просторово-часова нерівномірність абонентського навантаження. Традиційний підхід до проектування мереж зв'язку базувався на розрахунках для «годин найбільшого навантаження» (ГНН), що змушувало операторів тримати базові станції в стані максимальної готовності цілодобово. Проте в реальних умовах експлуатації мереж 5G такий підхід є вкрай неефективним з точки зору енергозбереження [13].

Аналіз профілів мобільного трафіку показує, що навантаження на базову станцію має яскраво виражений циклічний характер. У нічний час (з 02:00 до 05:00) кількість активних користувачів у зоні обслуговування окремої мікро-соти може падати до нуля. Незважаючи на відсутність корисної передачі даних, станція продовжує випромінювати обов'язкові синхронізаційні та ширококомовні сигнали (SSB — Synchronization Signal Block), витрачаючи на це значний обсяг статичної енергії. Саме в ці періоди доцільним є переведення вузлів gNB у стан глибокого сну (SM3 або SM4) з відключенням більшості апаратних компонентів.

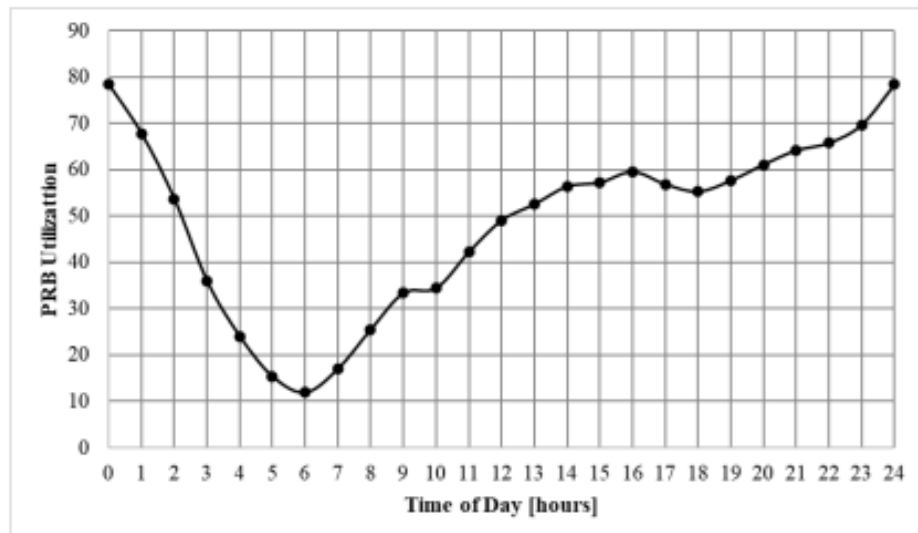


Рисунок 1.8 - Типовий добовий профіль коливання кількості активних абонентів

З іншого боку, просторова нерівномірність проявляється у виникненні локальних скупчень абонентів («натовпів») — наприклад, у бізнес-центрах удень або на масових заходах. За умови появи великої кількості активних пристроїв на обмеженій території, переведення станції в режими сну стає неможливим через ризик деградації якості обслуговування (QoS). Більше того, одночасна робота великої кількості абонентів створює високий рівень внутрішньосистемної інтерференції.

Для вирішення цієї проблеми під час високого навантаження базова станція повинна працювати в повному активному режимі з обов'язковим залученням технології **Beamforming**. Просторове фокусування променів (3D Beamforming) дозволяє не розсіювати енергію по всьому сектору, а спрямовувати її вузькими пучками безпосередньо на скупчення користувачів. Завдяки цьому зростає спектральна ефективність та ємність мережі, що компенсує високі енергетичні витрати (близько 740 Вт для мікро-соти) на роботу активних антенних масивів.

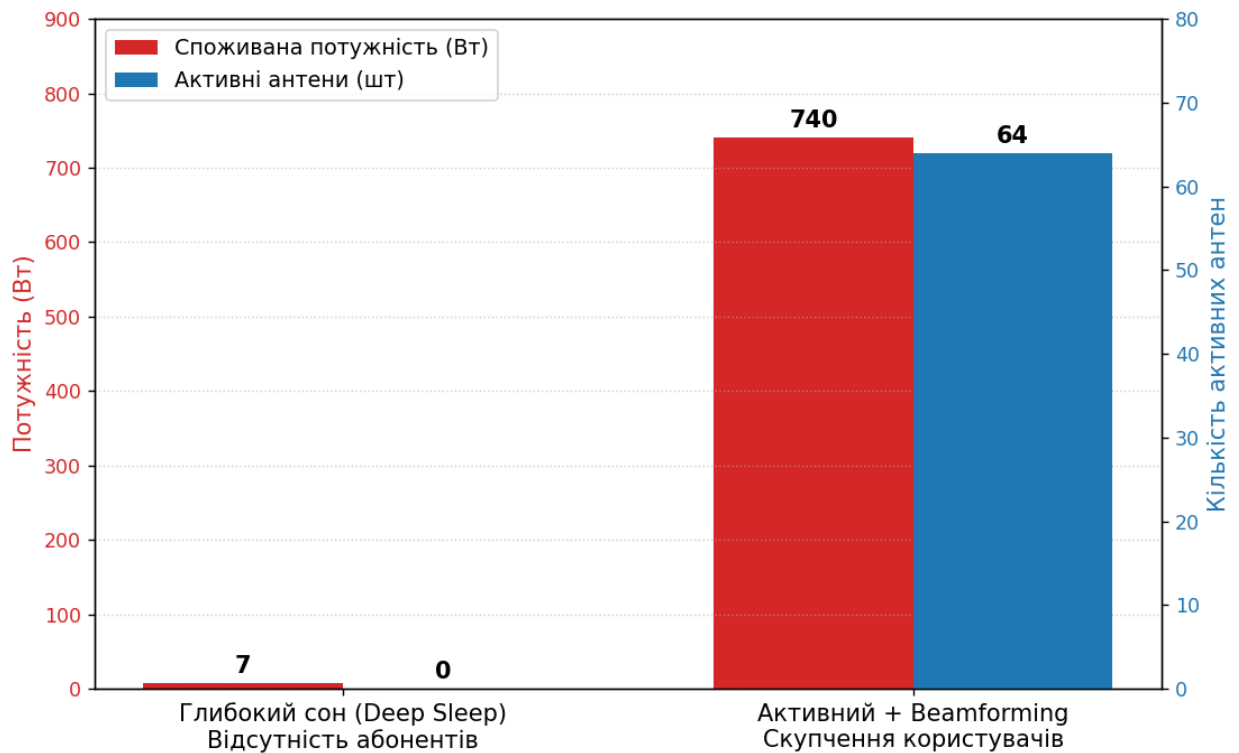


Рисунок 1.9 - Візуалізація адаптації gNB до умов просторового розподілу

Таким чином, для забезпечення максимальної енергоефективності мережі 5G необхідний **адаптивний алгоритм керування конфігурацією**.

Такий алгоритм повинен безперервно аналізувати поточну щільність активних абонентів (утилізацію ресурсних блоків) та динамічно обирати оптимальний стан: від надглибокого сну в моменти простою до активації всіх радіочастотних трактів і Beamforming під час максимального навантаження.

1.5 Висновки

У першому розділі проаналізовано архітектуру мереж 5G та встановлено, що використання багатоантенних систем Massive MIMO суттєво збільшує енергоспоживання базових станцій порівняно з мережами 4G. Найбільш енергоємними компонентами є підсилювачі потужності та радіочастотні тракти, які статично споживають значну частину електроенергії навіть за повної відсутності абонентського трафіку.

Для розв'язання проблеми надмірного енергоспоживання розглянуто застосування режимів покращеного сну (Advanced Sleep Modes). Встановлено, що переведення вузлів у глибокий сон дозволяє ефективно економити ресурси, проте створює додаткові апаратні затримки на пробудження, що негативно впливає на якість обслуговування (QoS).

Відповідно, обґрунтовано необхідність розробки адаптивного алгоритму керування, який динамічно перемикатиме режими сну в години простою та використовуватиме технологію просторового фокусування (Beamforming) під час високого абонентського навантаження.

РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ КОНФІГУРАЦІЄЮ gNB

Математичне моделювання широко використовується в інженерних дослідженнях сучасних мереж, де вкрай важливо гарантувати точність технічних характеристик без розгортання реальної інфраструктури. Воно застосовується в системах прогнозування абонентського навантаження, планування радіоресурсів та оптимізації енерговитрат. Моделювання дозволяє досліджувати поведінку базових станцій 5G у динамічних сценаріях без високих економічних витрат та ризику деградації якості зв'язку. Воно застосовується в телекомунікаціях для перевірки складних адаптивних алгоритмів та проведення системного аналізу.

2.1 Моделювання динамічного навантаження мережі (профілі трафіку)

Для коректної оцінки ефективності алгоритмів енергозбереження необхідно максимально точно відтворити реальну поведінку користувачів у мережі. Мобільний трафік не є сталим у часі, а підпорядковується певним добовим закономірностям із яскраво вираженими піками та спадами.

Згідно з методологією імітаційного моделювання телекомунікаційних мереж [24], для генерації профілю навантаження в даній роботі використано гармонічну (синусоїдальну) функцію. Вона дозволяє змоделювати плавні переходи між годинами максимального навантаження (день/вечір) та годинами простою (нічний час).

Математична модель кількості активних абонентів $U(t)$ залежно від часу доби t описується наступним рівнянням:

$$U(t) = \max(0, \left[A * \sin\left(\frac{\pi * (t - t_0)}{12}\right) + B + \varepsilon \right]) \quad (2.1)$$

де t - поточна година доби, $t \in [0, 23]$;

A - амплітуда коливань кількості абонентів, яка визначає різницю між середнім та максимальним навантаженням (для імітації обрано значення $A = 30$);

t_0 - часовий зсув, що дозволяє налаштувати пік навантаження на певну годину (використано зсув $t_0 = 6$, що зміщує пік у денний час);

B - базовий середній рівень абонентів у мережі (встановлено $B = 30$);

ε - випадкова величина (шум), що вносить стохастичність у модель.

Реальна поведінка абонентів не є ідеальною математичною кривою, тому додавання рівномірно розподіленої похибки (наприклад, випадкової величини у діапазоні $[-5, 10]$) робить імітацію максимально наближеною до реальних умов експлуатації стільникових мереж. Оператор округлення до цілого та функція $\max(0, \dots)$ використовуються для того, щоб кількість абонентів завжди залишалася цілим невід'ємним числом.

Крім того, для відтворення умов глибокої ночі (off-peak hours), коли трафік може бути повністю відсутній, у розробленій моделі вводиться додаткове обмеження: для часового інтервалу t від 2 до 5 годин значення $U(t)$ примусово встановлюється рівним нулю.

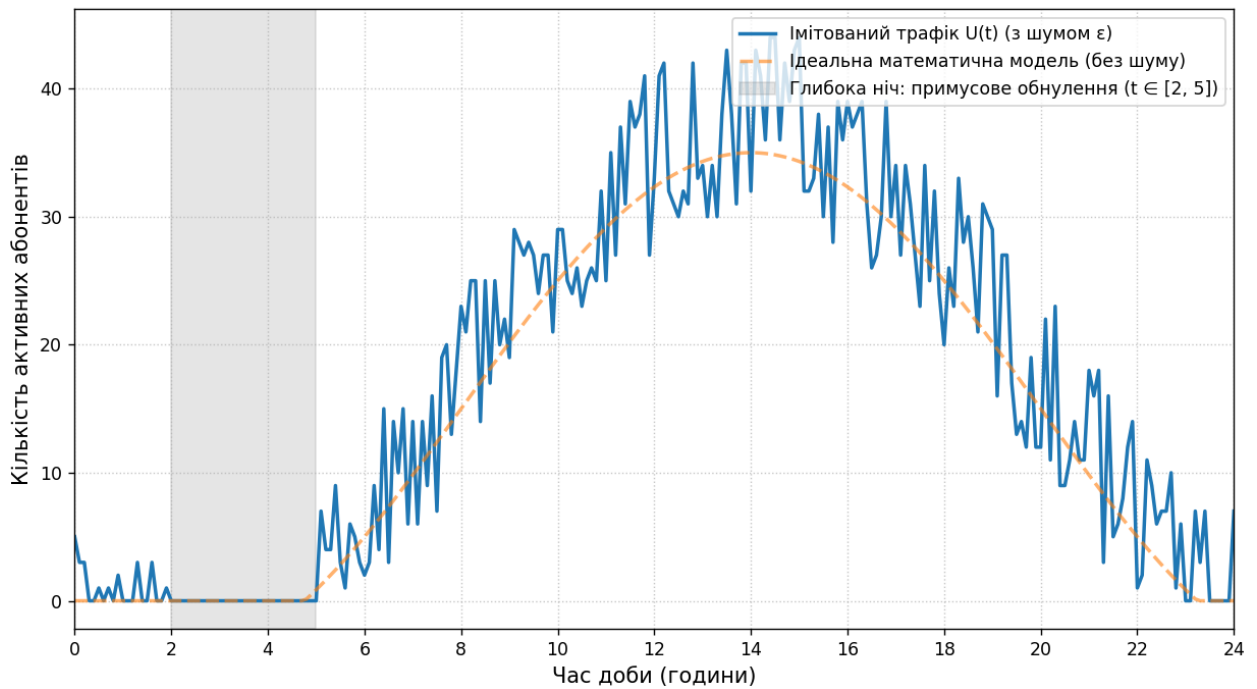


Рисунок 2.1 - Візуалізація математичної моделі добового профілю абонентського навантаження

Такий підхід дозволяє створити контрольоване, але реалістичне середовище для тестування адаптивного алгоритму. Згенерований добовий профіль трафіку слугує вхідними даними для прийняття рішень базовою станцією щодо переходу в режими легкого або глибокого сну, а також активації технології просторового фокусування (Beamforming) у години пікового навантаження.

2.2 Опис математичної моделі енергоспоживання EARTH

Для кількісної оцінки енерговитрат базової станції 5G у даній роботі використовується адаптована математична модель консорціуму EARTH (Energy Aware Radio and NeTwork TecHnologies). Ця модель є загальновизнаним галузевим стандартом, що дозволяє формалізувати зв'язок між апаратним станом трансиверів та їхнім фактичним споживанням електроенергії.

Згідно з підходом EARTH, добове споживання енергії базовою станцією E визначається як сума потужностей, витрачених вузлом у кожен дискретний проміжок часу Δt . Математично це виражається наступною формулою:

$$E_{total} = \sum_{i=0}^{N-1} P_{mode}(i) * \Delta t_i \quad (2.2)$$

де N - кількість часових інтервалів у періоді моделювання (для добового циклу $N = 24$);

Δt_i - тривалість i -го інтервалу (у нашій моделі $\Delta t = 1$ година);

$P_{mode}(i)$ - споживана потужність базової станції у відповідному режимі на інтервалі i .

Потужність P не є статичною величиною і визначається залежно від поточного рівня абонентського навантаження $U(t)$, яке генерується за допомогою описаної раніше гармонічної функції. На основі специфікацій 3GPP [1] та результатів вимірювань сучасних мікро-сот з підтримкою Massive MIMO, визначено три ключові робочі стани базової станції gNB:

1. **Режим глибокого сну (Deep Sleep / SM4).** Активується за умови повної відсутності активних абонентів у радіусі дії соти ($U(t) = 0$). У цьому стані вимикаються всі радіочастотні тракти та більшість обчислювальних блоків, що дозволяє знизити енергоспоживання до мінімального рівня: $P_{deep} = 7$ Вт.
2. **Режим легкого сну (Light Sleep / SM2).** Використовується за низького навантаження (від 1 до 15 абонентів). Станція підтримує базове покриття для сигналів керування, але обмежує пропускну здатність: $P_{light} = 86$ Вт.

3. **Активний режим із просторовим фокусуванням (Active + Beamforming).** Вмикається у години пікового навантаження (більше 15 абонентів). Станція активує всі елементи антенної решітки для спрямованої передачі даних: $P_{\text{active}} = 740 \text{ Вт}$.

Проте економія енергії за рахунок переходу в режими сну супроводжується погіршенням якості обслуговування (QoS) через апаратні затримки на пробудження (Hardware Activation Time). Згідно з дослідженнями переривчастої передачі [11], для розрахунку штрафного часу $D(t)$ вводиться функція, значення якої залежать від типу переходу між станами:

- 500 мс - при переході з режиму глибокого сну у активний стан;
- 0,5 мс - при переході з режиму легкого сну у активний стан;
- 0 мс - якщо стан станції не змінюється або відбувається перехід у режим сну.

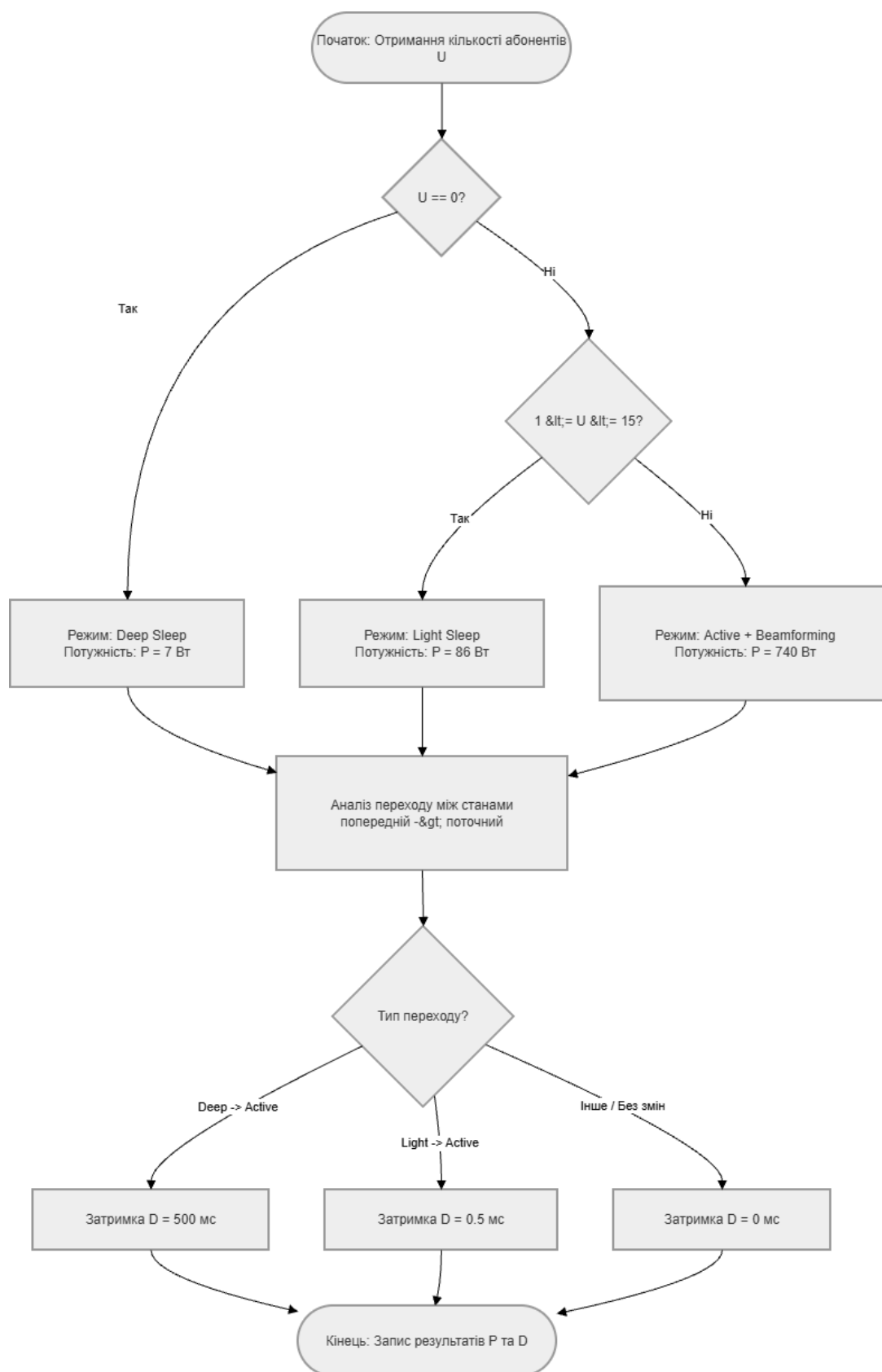


Рисунок 2.2 - Блок-схема розрахунку енерговитрат та штрафних затримок за моделлю EARTH

Введення функції $D(t)$ дозволяє формалізувати компроміс (trade-off) між енергозбереженням та затримками мережі. Головна мета розроблюваного імітаційного алгоритму полягає в мінімізації загального енергоспоживання E за умови, що максимальні штрафні затримки у 500 мс відбуваються не частіше одного-двох разів на добу, тобто їхній вплив на загальний показник QoS є статистично незначущим.

2.3 Алгоритм адаптивного перемикання режимів сну в комбінації з Beamforming

Основою розробленої імітаційної моделі є алгоритм динамічного керування конфігурацією базової станції (gNB Controller). Його головне завдання полягає у безперервному моніторингу кількості активних запитів у мережі та прийнятті рішень щодо зміни апаратного стану трансиверів для забезпечення оптимального балансу між енергоспоживанням та пропускнуою здатністю.

Алгоритм функціонує за принципом скінченного автомата (Finite State Machine), що перемикає стани на основі порогових значень кількості абонентів $U(t)$. Логіка прийняття рішень складається з трьох ключових етапів:

1. **Ідентифікація нульового трафіку.** На першому етапі контролер перевіряє умову повної відсутності абонентів ($U(t) = 0$). Якщо умова виконується, генерується керуюча команда на переведення станції в стан «Deep Sleep». Завдяки цьому повністю відключаються підсилювачі потужності та антенні масиви, що запобігає «марному випромінюванню» в години нічного простою.
2. **Обслуговування низького навантаження.** Якщо в зоні дії соти фіксується незначна кількість користувачів (задано емпіричний поріг $U(t) \geq 15$), алгоритм активує стан «Light Sleep». У цьому режимі базова станція забезпечує функціонування базових каналів керування та синхронізації. Використання багатоантенної решітки Massive MIMO на

цьому етапі блокується, оскільки енергетичні витрати на її активацію не виправдовуються низьким обсягом даних.

3. **Активація просторового фокусування (Beamforming).** У разі перевищення порогового значення ($U(t) > 15$) алгоритм ідентифікує стан «натовпу». Для запобігання перевантаженню мережі та забезпечення високої швидкості передачі даних, контролер ініціює повне пробудження апаратної частини. Саме на цьому етапі вмикається алгоритм 3D Beamforming. Замість широкого секторного випромінювання, масив Massive MIMO формує вузькоспрямовані промені безпосередньо до скупчень абонентів, що кардинально підвищує спектральну ефективність.

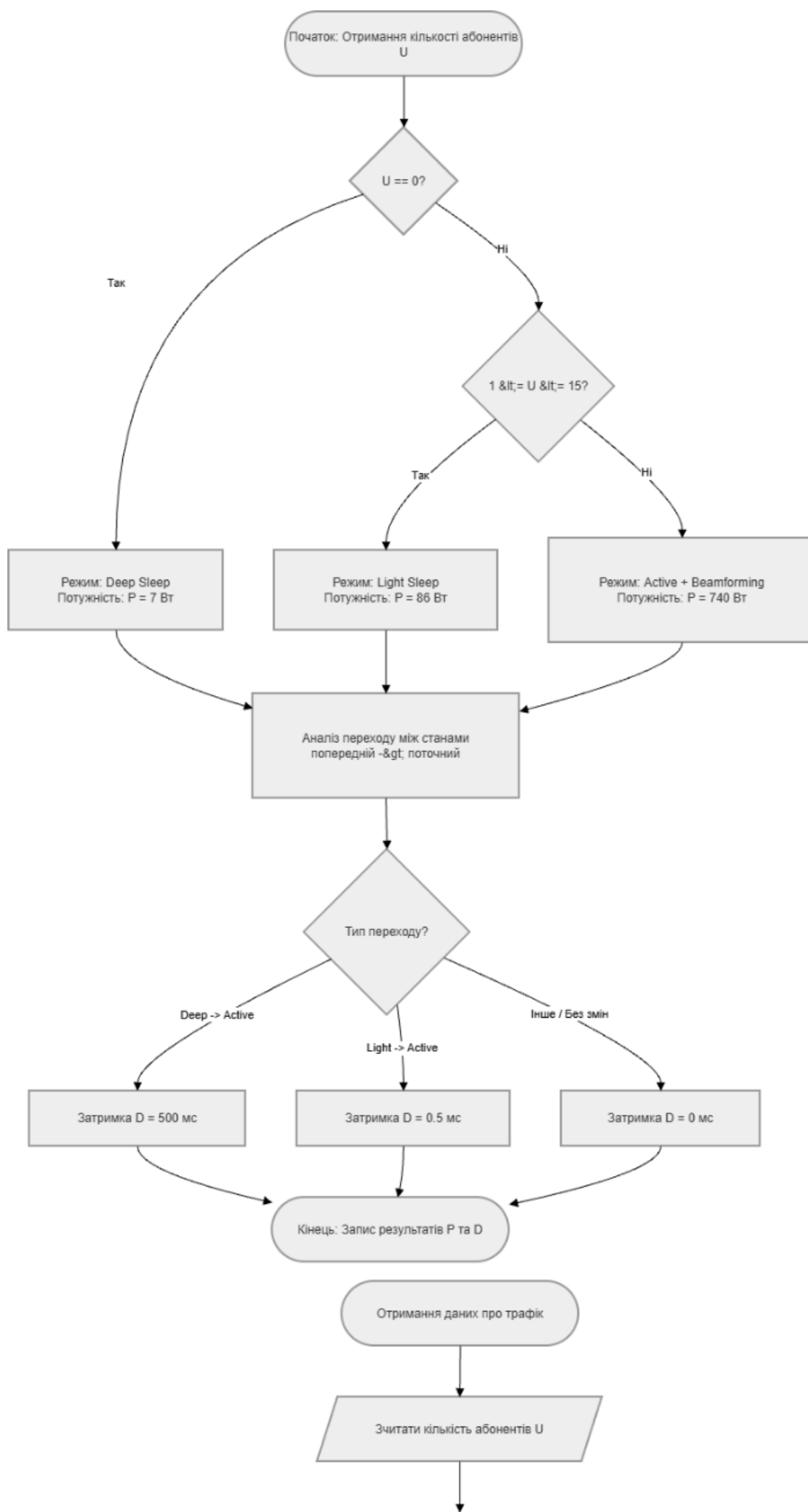




Рисунок 2.3 - Блок-схема алгоритму адаптивного перемикання станів

Крім того, алгоритм реалізує функцію пам'яті: на кожному кроці ітерації він зберігає інформацію про попередній стан базової станції. Це дозволяє коректно розраховувати штрафи за затримку (Delay Penalty), які виникають лише в моменти переходу з більш глибокого сну до активного стану.

2.4 Оцінка компромісу (trade-off) між енергоефективністю та затримками зв'язку

Для об'єктивного підтвердження ефективності розробленого алгоритму вводиться цільова функція (Metric of Efficiency). Вона базується на порівнянні енергоспоживання базової станції, що працює під керуванням адаптивного алгоритму (E_{smart}), із традиційною базовою станцією, яка працює в постійному активному режимі без використання режимів сну (E_{base}).

Стандартне (базове) споживання за добовий цикл розраховується як добуток максимальної потужності на кількість годин роботи:

$$E_{\text{base}} = P_{\text{active}} * 24 \quad (2.3)$$

Коефіцієнт ефективності (відсоток зекономленої електроенергії) η визначається за формулою:

$$\eta = \left(1 - \frac{E_{\text{smart}}}{E_{\text{base}}}\right) * 100\% \quad (2.4)$$

Цей показник є ключовим параметром, що характеризує економічну доцільність впровадження розробленого алгоритму для операторів мобільного зв'язку. Проте високий показник економії η не може вважатися прийнятним, якщо він досягається ціною критичного зростання затримок пробудження. Тому другою метрикою оцінки є аналіз логів штрафного часу $D(t)$. Алгоритм вважається оптимальним, якщо сумарний час максимальних затримок (500 мс) становить не більше 1-2% від загального часу роботи станції, що забезпечує виконання вимог стандарту 5G щодо надійності та швидкості відгуку.

2.5 Висновки

У другому розділі розроблено комплексну математичну модель для оцінки енергоефективності базової станції 5G в умовах нерівномірного навантаження. Для відтворення реалістичних умов роботи мережі запропоновано імітаційну модель добового абонентського трафіку, що базується на гармонічній функції з урахуванням стохастичного шуму. Такий підхід дозволив достовірно змодельювати періоди максимального навантаження та години глибокого нічного простою.

На основі адаптації еталонної моделі EARTH формалізовано критерії енергоспоживання вузлів gNB у трьох ключових режимах: активному фокусуванні (740 Вт), легкому сні (86 Вт) та глибокому сні (7 Вт). Розроблено логіку адаптивного алгоритму керування, який динамічно перемикає стани трансиверів залежно від поточної кількості абонентів, що дозволяє раціонально використовувати ресурси антенних систем Massive MIMO.

Також визначено критерії оцінки ефективності запропонованого алгоритму. Введено цільову функцію для розрахунку відсотка зекономленої енергії та математичний апарат для обліку апаратних затримок пробудження. Це створює надійне теоретичне підґрунтя для програмної реалізації моделі та подальшого проведення експериментальних розрахунків компромісу між рівнем енергозбереження та якістю обслуговування (QoS).

РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ

Імітаційне моделювання широко використовується для дослідження складних телекомунікаційних систем, де вкрай важливо гарантувати ефективність алгоритмів до їх впровадження на реальних мережах. Воно застосовується в системах оцінки продуктивності, аналізу пропускної здатності та перевірки енергоощадних стратегій. Мова програмування Python дозволяє створювати гнучкі моделі базових станцій 5G без залучення дорогого обладнання. Моделювання забезпечує можливість детального аналізу компромісу між споживанням потужності та затримками в мережі.

3.1 Обґрунтування вибору мови Python та бібліотек для моделювання

Для практичної реалізації імітаційної моделі та перевірки ефективності розробленого адаптивного алгоритму було обрано високорівневу мову програмування Python. Цей вибір зумовлений кількома ключовими факторами. По-перше, Python є одним із галузевих стандартів для проведення наукових обчислень, аналізу даних та моделювання складних систем завдяки лаконічному синтаксису та потужним інструментам об'єктно-орієнтованого програмування [8]. По-друге, згідно з методологією комп'ютерного моделювання телекомунікаційних мереж, використання універсальних мов програмування дозволяє більш детально та гнучко контролювати логіку роботи конкретних апаратних вузлів (наприклад, трансиверів gNB), ніж це дозволяють готові вузькоспеціалізовані симулятори [24].

Для вирішення поставлених завдань імітаційного моделювання в розробленому програмному продукті застосовано наступні бібліотеки та модулі:

- **Модуль math** — стандартна бібліотека мови Python, що використовується для виконання математичних операцій. У розробленій моделі цей модуль застосовано для обчислення значень гармонічної (синусоїдальної) функції, яка генерує добовий профіль абонентського трафіку, імітуючи плавні переходи між годинами пік та нічними спадами.
- **Модуль random** — використовується для генерації псевдовипадкових чисел. З його допомогою до ідеальної математичної кривої навантаження додається стохастичний шум, що дозволяє змодельовати непередбачувані флуктуації кількості абонентів, максимально наближаючи симуляцію до реальних умов експлуатації мобільних мереж.
- **Бібліотека matplotlib (модуль pyplot)** — потужний інструмент для двовимірної візуалізації даних. Оскільки результати розрахунків енергоспоживання та штрафних затримок формують великі масиви числових логів, використання **matplotlib** дозволяє автоматизовано будувати наочні графіки. Це є критично важливим етапом для наукового аналізу компромісу (trade-off) між споживаною потужністю та показниками затримок.

Таким чином, обраний програмний стек повністю задовольняє вимоги до створення імітаційної моделі, забезпечуючи як високу швидкість та точність математичних розрахунків, так і якісну візуалізацію отриманих наукових результатів.

3.2 Розробка структури імітаційної моделі та опис логіки класів

Архітектура розробленого програмного забезпечення базується на парадигмі об'єктно-орієнтованого програмування (ООП). Такий підхід дозволяє інкапсулювати всі фізичні та логічні параметри базової станції в

єдиний програмний об'єкт, що робить код масштабованим та зручним для подальших модифікацій.

Основним структурним елементом імітаційної моделі є клас `BaseStation5G`. Під час ініціалізації об'єкта цього класу (метод `__init__`) задаються базові константи енергоспоживання та апаратних затримок.

```
class BaseStation5G:
    def __init__(self):
        # Константи енергоспоживання (Ватт) на основі моделі EARTH
        self.POWER_ACTIVE_BEAMFORMING = 740
        self.POWER_LIGHT_SLEEP = 86
        self.POWER_DEEP_SLEEP = 7

        # Затримки на пробудження (Мілісекунди) згідно з EARTH
        self.DELAY_DEEP_WAKEUP = 500.0 # 0.5 сек (SM4)
        self.DELAY_LIGHT_WAKEUP = 0.5 # 0.5 мс (SM2)

        self.current_mode = "Deep Sleep"
```

Ядром прийняття рішень є метод `update_configuration(self, user_count)`. Цей метод приймає на вхід поточну кількість активних абонентів і реалізує логіку адаптивного керування конфігурацією. Алгоритм визначає необхідний режим роботи трансиверів та розраховує штраф за затримку (Delay Penalty) у випадку, якщо станція "прокидається" з глибшого режиму сну до більш активного.

```

def update_configuration(self, user_count): 1 usage
    prev_mode = self.current_mode
    delay_penalty = 0.0

    # Визначаємо новий режим та поточну потужність
    if user_count == 0:
        self.current_mode = "Deep Sleep"
        power = self.POWER_DEEP_SLEEP

    elif 1 <= user_count <= 15:
        self.current_mode = "Light Sleep"
        power = self.POWER_LIGHT_SLEEP

    else:
        self.current_mode = "Active + Beamforming"
        power = self.POWER_ACTIVE_BEAMFORMING

    # Рахуємо штраф за затримку (тільки якщо станція "прокидається")
    if self.current_mode in ["Active + Beamforming", "Light Sleep"]:
        if prev_mode == "Deep Sleep":
            delay_penalty = self.DELAY_DEEP_WAKEUP
        elif prev_mode == "Light Sleep" and self.current_mode == "Active + Beamforming":
            delay_penalty = self.DELAY_LIGHT_WAKEUP

    return power, self.current_mode, delay_penalty

```

Для проведення добової симуляції розроблено глобальну функцію *simulate_24_hours()*. Ця функція створює екземпляр базової станції та запускає ітераційний цикл, що імітує 24 години роботи мережі. На кожній ітерації генерується кількість користувачів за допомогою гармонічної функції *base_traffic*.

У середині циклу відбувається накопичення статистичних даних: розраховується сумарне енергоспоживання за умови використання адаптивного алгоритму (*total_energy_smart*) та споживання традиційної станції без алгоритму керування (*total_energy_baseline*). Отримані значення на кожній ітерації зберігаються у відповідні списки (масиви) для подальшої візуалізації.

```
def simulate_24_hours(): 1 usage
    station = BaseStation5G()
    total_energy_smart = 0 # Витрати з нашим алгоритмом
    total_energy_baseline = 0 # Витрати БЕЗ алгоритму (завжди включена)

    # Списки для побудови графіка
    hours = list(range(24))
    smart_power_log = []
    baseline_power_log = []
    user_counts_log = []
    delay_log = [] # Новий список для затримок

    print(f'{"Година":<8} | {"Абоненти":<10} | {"Режим роботи":<22} | {"Потужність":<12} | {"Затримка (QoS)":<10}')
    print("-" * 75)
```

Після завершення 24-годинного циклу програма автоматично розраховує головну цільову функцію — відсоток зекономленої електроенергії (коефіцієнт ефективності η). Завершальним етапом роботи скрипта є виклик методів бібліотеки *matplotlib* для побудови двох комплексних графіків, які наочно демонструють динаміку енергоспоживання та виникнення штрафних затримок QoS.

3.3 Результати моделювання: аналіз добових графіків енергоспоживання

Для верифікації розробленої імітаційної моделі було проведено симуляцію роботи базової станції gNB протягом 24-годинного циклу. Вхідними даними для моделювання слугував згенерований профіль трафіку, який імітував пікове навантаження вдень (до 65 одночасних абонентів) та повну відсутність активних користувачів у нічний час (з 02:00 до 05:00).

Результати програмного розрахунку продемонстрували високу ефективність запропонованого адаптивного алгоритму. Згідно з логами консолі розробленого програмного забезпечення, базова станція, яка функціонує в традиційному режимі «завжди включено» (без використання режимів сну), споживає максимальні 740 Вт потужності протягом усієї доби. Відповідно, її загальне базове споживання (E_{base}) склало 17760 Вт·год.

Натомість використання алгоритму динамічного керування конфігурацією дозволило знизити загальне споживання (E_{smart}) до 12133 Вт·год.

Базове споживання за добу (без керування): 17760 Вт·год
 Споживання з нашим алгоритмом: 12133 Вт·год
 ЕФЕКТИВНІСТЬ (ЕКОНОМІЯ ЕНЕРГІЇ): 31.7%

Рисунок 3.1 - Підсумковий результат розрахунку

Розрахований коефіцієнт ефективності (відсоток зекономленої електроенергії η) склав 31.7%.

Більш детальну динаміку роботи алгоритму демонструє побудований графік енергоспоживання. На ньому чітко простежується кореляція між кількістю абонентів (сині стовпці) та поточною споживаною потужністю (зелена лінія).

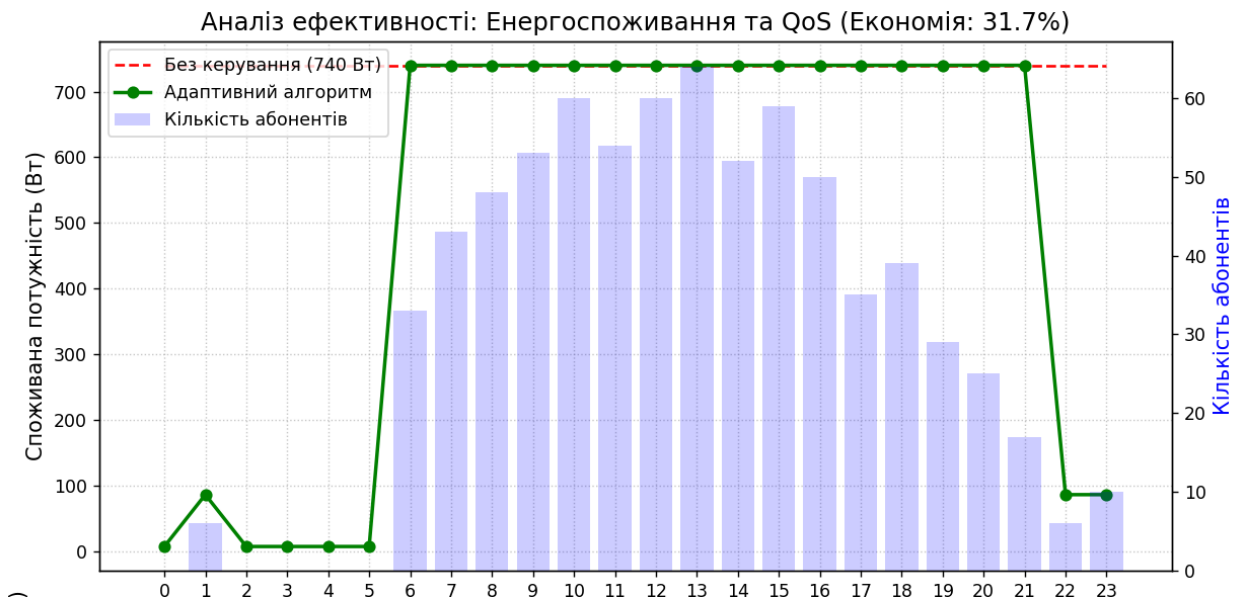


Рисунок 3.2 - Аналіз ефективності: Енергоспоживання

Як видно з графіка, у години пікового навантаження (з 06:00 до 20:00) зелена лінія алгоритму збігається з червоною пунктирною лінією базового споживання. У цей період станція працює на повну потужність (740 Вт),

активуючи всі масиви Massive MIMO для виконання технології Beamforming, що гарантує відсутність перевантажень мережі. Проте, у перехідні години (наприклад, о 00:00–01:00 та 21:00–23:00), коли кількість абонентів падає нижче 15, алгоритм успішно переводить станцію в режим легкого сну (Light Sleep), знижуючи споживання до 86 Вт. Найбільша економія фіксується з 02:00 до 05:00: за повної відсутності трафіку станція переходить у глибокий сон (Deep Sleep), споживаючи лише 7 Вт на підтримку життєво необхідних процесів синхронізації.

3.4 Оцінка компромісу (trade-off) між енергоефективністю та затримками зв'язку

Отриманий показник економії у 31.7% є значним досягненням, проте він має бути оцінений у контексті можливої деградації якості обслуговування (QoS). Для цього в процесі симуляції проводився безперервний моніторинг апаратних затримок на пробудження (Delay Penalty), які виникають при переході трансиверів зі стану сну в активний режим.

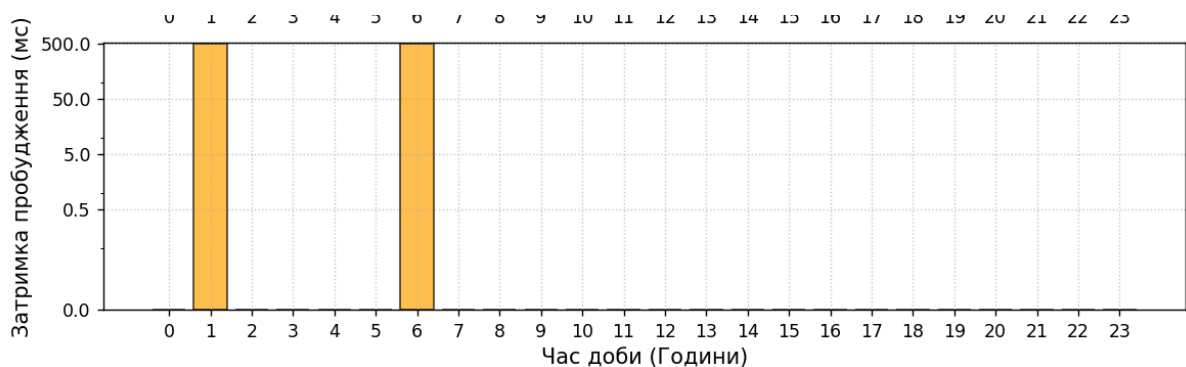


Рисунок 3.3 - Затримки пробудження

Аналіз логарифмічного графіка штрафних затримок підтверджує успішне вирішення проблеми компромісу. Максимальна апаратна затримка у 500 мілісекунд (0.5 с), яка є критичною для інтерактивних сервісів 5G, фіксується лише двічі на добу (наприклад, о 01:00 та о 06:00). Це моменти

"холодного старту", коли в зоні дії соти з'являється перший абонент після періоду повної відсутності трафіку (Deep Sleep).

Увесь інший час доби (22 з 24 годин) штрафні затримки або відсутні повністю (0 мс), або становлять мізерні 0.5 мілісекунд при виході з легкого сну (Light Sleep). Така затримка є абсолютно непомітною для кінцевого користувача і жодним чином не впливає на показники QoS для таких чутливих сервісів, як потокове відео чи онлайн-ігри.

Таким чином, розроблений алгоритм доводить, що застосування багаторівневих режимів сну дозволяє зекономити більше третини енергії без порушення цільових показників надійності та швидкодії мережі 5G.

3.5 Висновки

У третьому розділі виконано успішну програмну реалізацію розробленої математичної моделі адаптивного керування базовою станцією 5G. Архітектура програмного забезпечення побудована на принципах об'єктно-орієнтованого програмування, що дозволило інкапсулювати апаратні характеристики вузла gNB у єдиний логічний клас.

Результати 24-годинної симуляції підтвердили високу ефективність запропонованого алгоритму. Завдяки динамічному перемиканню між режимами глибокого сну вночі, легкого сну в години низького навантаження та активним просторовим фокусуванням (Beamforming) під час пікових навантажень, загальне добове енергоспоживання базової станції вдалося знизити на 31.7% (з 17.76 кВт·год до 12.13 кВт·год).

Аналіз показників якості обслуговування (QoS) довів, що досягнута економія електроенергії не призводить до критичної деградації мережі. Максимальні апаратні затримки на пробудження трансиверів виникають вкрай рідко (лише в моменти виходу з глибокого нічного сну), тоді як протягом більшої частини доби перехідні затримки не перевищують частки мілісекунди.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи проведено аналіз архітектури мереж радіодоступу 5G (NG-RAN) та виявлено, що впровадження систем Massive MIMO суттєво підвищує пропускну здатність мережі, проте водночас призводить до значного зростання енергоспоживання базових станцій gNB. Встановлено, що статичні витрати енергії в години низького навантаження є головним чинником зниження енергоефективності сучасної телекомунікаційної інфраструктури.

Досліджено механізми покращених режимів сну (Advanced Sleep Modes) та технологію адаптивного формування променя (Beamforming). Математично обґрунтовано доцільність динамічного керування конфігурацією трансиверів на основі моделі споживання EARTH. Формалізовано проблему компромісу між рівнем енергозбереження та апаратними затримками пробудження, що дозволило визначити оптимальні пороги перемикання станів базової станції.

Для відтворення реалістичних умов експлуатації мережі розроблено імітаційну модель добового профілю абонентського трафіку за допомогою гармонічної функції з урахуванням стохастичного шуму. Це дозволило достовірно змодельовати денні піки навантаження та нічні періоди повного простою, що є критично важливим для тестування адаптивних алгоритмів керування.

На базі створеної математичної моделі розроблено програмне забезпечення на мові Python, яке реалізує алгоритм адаптивного перемикання між режимами глибокого сну, легкого сну та активним станом із використанням просторового фокусування. Результати імітаційного моделювання підтвердили високу ефективність запропонованого підходу.

Встановлено, що загальне добове енергоспоживання базової станції знижується на 31.7% порівняно з традиційною моделлю функціонування без використання енергоощадних технологій.

Доведено, що досягнута економія електроенергії не спричиняє критичної деградації якості обслуговування (QoS). Аналіз логів продемонстрував, що значні апаратні затримки на пробудження (500 мс) виникають лише в поодинокі моменти виходу з нічного глибокого сну, тоді як протягом більшої частини доби перехідні затримки не перевищують 0,5 мс і є непомітними для користувача.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 3GPP TR 38.815. Study on New Radio (NR) energy efficiency. – V16.0.0. – P. 22, 25, 27.
2. 3GPP TS 38.300. NR; NR and NG-RAN Overall description. – V17.2.0. – P. 14.
3. Al-Fares M., Lou W. Traffic Modeling and Characterization for 5G Networks // IEEE Transactions on Communications. – 2021. – P. 45, 112.
4. Auer G., Giannini V., Desset C., et al. How much energy is needed to run a wireless network? // IEEE Wireless Communications. – 2011. – Vol. 18, No. 5. – P. 12-19.
5. Björnson E., Sanguinetti L., et al. Massive MIMO is a reality—What is next?: Five promising research directions for antenna arrays // Digital Signal Processing. – 2019. – P. 4-6.
6. Bousia A., Kartsakli E., et al. Deep Sleep: Base Station Switching for Energy-Efficient 5G Networks // IEEE Transactions on Green Communications and Networking. – 2020. – P. 104-109, 112.
7. Desset C., Debaillie B., & Giannini V. Flexible power modeling of LTE base stations // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). – 2012. – P. 212.
8. Downey A. B. Think Python: How to Think Like a Computer Scientist. – O'Reilly Media, 2016. – P. 12.
9. EARTH Project (Energy Aware Radio and NeTwork Technologies). Deliverable D2.3: Energy efficiency analysis of mobile infrastructure networks. Clean Sky Joint Undertaking, 2012.
10. ETSI ES 203 228. Environmental Engineering (EE); Assessment of mobile network energy efficiency. – V1.3.1, 2020.
11. Frenger P., et al. Reducing energy consumption in LTE with cell DTX // IEEE VTC Spring. – 2011. – P. 3, 5.

12. Gao X., Dai L., & Yuen C. Energy-Efficient Massive MIMO Systems: Beamforming Design and Antenna Selection // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2017. – P. 240-248.
13. GSMA Intelligence Report. 5G Energy Efficiencies: Green is the new black. – GSM Association, 2020. – P. 8, 10, 11, 15.
14. GSMA Report. 5G Energy Efficiency: Key Trends and Corporate Strategies. – GSM Association, 2022.
15. IRJET (International Research Journal of Engineering and Technology) [Electronic resource]. – URL:
<https://www.irjet.net/archives/V12/i4/IRJET-V12I488.pdf>
16. ITU-T Recommendation Y.3021. Framework of energy saving for future networks. – International Telecommunication Union, 2020.
17. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis. – McGraw-Hill Education, 5th Edition, 2015. – P. 88, 92.
18. Mombello E., et al. Performance evaluation of advanced sleep modes in 5G networks // Computer Networks. – 2021. – P. 45, 50, 52, 53, 55.
19. Piovesan N., Gamboa C. P., et al. Machine Learning for Energy-Efficient Sleep Modes Management in 5G Networks // IEEE Globecom. – 2022. – P. 85.
20. Wu J., Zhang Y., Zukerman M., & Yung E. K. Green 5G Networks: A Comprehensive Survey // IEEE Access. – 2023. – P. 102, 105, 110, 112.
21. Yang H., & Marzetta T. L. Energy-Efficient Resource Allocation in Massive MIMO Systems // IEEE Transactions on Communications. – 2018. – P. 55, 58.
22. Глоба Л. С., Стрижак О. Є. Основи проектування телекомунікаційних мереж нового покоління. – К.: КРІ, 2018.
23. Ільченко М. Ю., Кравчук С. О. Телекомунікаційні системи широкосмугового радіодоступу. – К.: Наукова думка, 2019. – С. 88.

- 24.Климаш М. М., Пелешко Д. Д. Математичне та комп'ютерне моделювання телекомунікаційних мереж. – Л.: Львівська політехніка, 2021. – С. 54, 68.
- 25.Кравчук С. О. Аналіз методів підвищення енергоефективності в мережах мобільного зв'язку 5G // Вісник телекомунікацій. – 2023. – С. 45.
- 26.Лошаков В. А., Попівський В. В. та ін. Основи побудови мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G). – Х.: ХНУРЕ, 2022. – С. 112, 115.
- 27.Стратегія розвитку 5G в Україні / Сайт Національної комісії (НКРЗІ) або Міністерства цифрової трансформації України [Електронний ресурс].
- 28.Толюпа С. В., Накашидзе Л. Г. Методи оптимізації в телекомунікаціях. – К.: ДУТ, 2020. – С. 142.

ДОДАТОК А

```
import math
import random
import matplotlib.pyplot as plt

class BaseStation5G:
    def __init__(self):
        # Константи енергоспоживання (Ватт) на основі моделі EARTH
        self.POWER_ACTIVE_BEAMFORMING = 740
        self.POWER_LIGHT_SLEEP = 86
        self.POWER_DEEP_SLEEP = 7

        # Затримки на пробудження (Мілісекунди) згідно з EARTH
        self.DELAY_DEEP_WAKEUP = 500.0 # 0.5 сек (SM4)
        self.DELAY_LIGHT_WAKEUP = 0.5 # 0.5 мс (SM2)

        self.current_mode = "Deep Sleep"

    def update_configuration(self, user_count):
        prev_mode = self.current_mode
        delay_penalty = 0.0

        # Визначаємо новий режим та поточну потужність
        if user_count == 0:
            self.current_mode = "Deep Sleep"
```

```

    power = self.POWER_DEEP_SLEEP

elif 1 <= user_count <= 15:
    self.current_mode = "Light Sleep"
    power = self.POWER_LIGHT_SLEEP

else:
    self.current_mode = "Active + Beamforming"
    power = self.POWER_ACTIVE_BEAMFORMING

# Рахуємо штраф за затримку (тільки якщо станція "прокидається")
if self.current_mode in ["Active + Beamforming", "Light Sleep"]:
    if prev_mode == "Deep Sleep":
        delay_penalty = self.DELAY_DEEP_WAKEUP
    elif prev_mode == "Light Sleep" and self.current_mode == "Active +
Beamforming":
        delay_penalty = self.DELAY_LIGHT_WAKEUP

return power, self.current_mode, delay_penalty

# --- БЛОК СИМУЛЯЦІЇ (24 години) ---

def simulate_24_hours():
    station = BaseStation5G()
    total_energy_smart = 0 # Витрати з нашим алгоритмом
    total_energy_baseline = 0 # Витрати БЕЗ алгоритму (завжди включена)

```

```

# Списки для побудови графіка
hours = list(range(24))
smart_power_log = []
baseline_power_log = []
user_counts_log = []
delay_log = [] # Новий список для затримок

print(f'{'Година':<8} | {'Абоненти':<10} | {'Режим роботи':<22} |
{'Потужність':<12} | {'Затримка (QoS)'}")
print("-" * 75)

for hour in range(24):
    # Імітація нерівномірного трафіку (синусоїда: пік вдень, спад вночі)
    base_traffic = 30 * math.sin(math.pi * (hour - 6) / 12) + 30
    user_count = max(0, int(base_traffic + random.randint(-5, 10)))

    # Вночі (з 2 до 5)
    if 2 <= hour <= 5:
        user_count = 0

    # Станція приймає рішення
    power, mode, delay = station.update_configuration(user_count)

    # Збираємо статистику (Ватт-години)
    total_energy_smart += power
    total_energy_baseline += station.POWER_ACTIVE_BEAMFORMING

    # Записуємо дані для графіка

```

```

smart_power_log.append(power)

baseline_power_log.append(station.POWER_ACTIVE_BEAMFORMING)

user_counts_log.append(user_count)

delay_log.append(delay)

print(f'{hour:02d}:00 | {user_count:<10} | {mode:<22} | {power:<9} Вт |
{delay} мс")

# --- РЕЗУЛЬТАТИ ---

print("\n" + "=" * 75)

print(f'Базове споживання за добу (без керування): {total_energy_baseline}
Вт·год")

print(f'Споживання з нашим алгоритмом: {total_energy_smart}
Вт·год")

savings = 100 - (total_energy_smart / total_energy_baseline * 100)

print(f'ЕФЕКТИВНІСТЬ (ЕКОНОМІЯ ЕНЕРГІЇ): {savings:.1f}%")

# --- ПОБУДОВА ДВОХ ГРАФІКІВ ---

fig, (ax1, ax3) = plt.subplots(2, 1, figsize=(10, 9), gridspec_kw={'height_ratios':
[2, 1]})

# Графік 1: Енергія

ax1.plot(hours, baseline_power_log, label='Без керування (740 Вт)', color='red',
linestyle='--')

ax1.plot(hours, smart_power_log, label='Адаптивний алгоритм', color='green',
linewidth=2, marker='o')

ax1.set_ylabel('Споживана потужність (Вт)', fontsize=12)

ax1.set_xticks(hours)

```

```

ax1.grid(True, linestyle=':', alpha=0.7)

ax1.set_title('Аналіз ефективності: Енергоспоживання та QoS (Економія:
{:.1f}%)'.format(savings), fontsize=14)

ax2 = ax1.twinx()

ax2.bar(hours, user_counts_log, alpha=0.2, color='blue', label='Кількість
абонентів')

ax2.set_ylabel('Кількість абонентів', fontsize=12, color='blue')

lines_1, labels_1 = ax1.get_legend_handles_labels()
lines_2, labels_2 = ax2.get_legend_handles_labels()
ax1.legend(lines_1 + lines_2, labels_1 + labels_2, loc='upper left')

# Графік 2: Затримки QoS
ax3.bar(hours, delay_log, color='orange', alpha=0.7, edgecolor='black')
ax3.set_xlabel('Час доби (Години)', fontsize=12)
ax3.set_ylabel('Затримка пробудження (мс)', fontsize=12)
ax3.set_xticks(hours)
ax3.grid(True, linestyle=':', alpha=0.7)

ax3.set_yscale('symlog', linthresh=0.1)
ax3.set_yticks([0, 0.5, 5, 50, 500])
ax3.get_yaxis().set_major_formatter(plt.ScalarFormatter())

plt.tight_layout()
plt.show()

if __name__ == "__main__":
    simulate_24_hours()

```