

**Ходаківський С. В.**

науковий співробітник

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових

експертиз Служби безпеки України

<https://orcid.org/0009-0004-1411-3978>

## **ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ АНТЕННІ СИСТЕМИ ДЛЯ ПРИСТРОЇВ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ**

**JEL Classification: I23**

**SECTION "ECONOMICS": Економіка**

**Анотація.** Проведено аналіз сучасних підходів до розробки енергоефективних антенних систем, орієнтованих на вимоги пристроїв Інтернету речей (IoT). Визначено ключові сценарії застосування IoT-рішень у сферах розумного дому, точного землеробства, медицини та промислового моніторингу, для яких характерні суворі обмеження на енергоспоживання, розмірів та вартості компонентів. Проведено класифікацію сучасних архітектур малопотужних антен, а також визначено особливості використання метаматеріалів для підвищення ефективності випромінювання в обмеженому об'ємі. Проаналізовано антенні системи зі змінною конфігурацією, здатні до динамічної адаптації до змін середовища або режимів роботи. Особливу увагу приділено методам зниження втрат енергії, як то оптимізація узгодження імпедансу, зменшення показника відбиття, вибір високодielekтричних матеріалів, а також інтеграції з енергоощадними мікроконтролерами та схемами живлення. Досліджено вплив зовнішніх факторів, як то температури, положення, вологості, на параметри антен та проаналізовано сучасні адаптивні підходи до автоналаштування характеристик, зокрема на основі MEMS-структур та алгоритмів машинного навчання. Окреслено методологію моделювання й тестування енергоефективних антенних систем із залученням чисельних методів (FDTD, FEM, MoM), цифрових двійників та інструментів симуляції енергоспоживання. Представлено підходи до стендових випробувань із врахуванням особливостей середовища. Узагальнено послідовність побудови енергоефективної антенної підсистеми, яка включає етапи постановки задачі, вибору архітектури, симуляції, інтеграції та тестування. Сформульовано критерії оптимальності, серед яких: мінімальне енергоспоживання, стабільність сигналу, просторове охоплення та адаптивність. Запропоновано методологічний підхід до адаптації антенних систем під різні класи пристроїв, з урахуванням сценарію використання, обмежень середовища та вимог до тривалості автономної роботи.

**Ключові слова:** IoT-пристрої, енергоефективність, антенні системи, метаматеріали, цифровий двійник, автоналаштування, малопотужний зв'язок.

**Annotation.** This study presents a comprehensive analysis of modern approaches to designing energy-efficient antenna systems tailored to the specific requirements of Internet of Things (IoT) devices. Key application scenarios are outlined, including smart homes, precision agriculture, healthcare monitoring, and industrial sensing, all of which impose strict constraints on power consumption, physical dimensions, and component cost. A classification of low-power antenna architectures is provided, alongside a review of metamaterial-based designs for improving radiation efficiency in limited volumes. Reconfigurable antenna systems capable of

dynamic adaptation to environmental conditions or operational modes are examined in detail. Particular attention is devoted to loss reduction techniques such as impedance matching optimization, minimization of the reflection coefficient, selection of high-permittivity materials, and integration with energy-efficient microcontrollers and power management circuits. The impact of environmental factors—including temperature, orientation, and humidity—on antenna parameters is analyzed, along with current adaptive approaches to self-tuning performance based on MEMS structures and machine learning algorithms. A methodology for modeling and testing energy-efficient antenna systems is outlined, involving numerical methods (FDTD, FEM, MoM), digital twin technology, and energy consumption simulation tools. Experimental testing strategies are discussed, with an emphasis on environmental conditions. The article synthesizes a step-by-step framework for developing energy-efficient antenna subsystems, including task formulation, architectural selection, simulation, integration, and validation. Optimization criteria are proposed, such as minimal energy consumption, signal stability, spatial coverage, and adaptability. A methodological approach is introduced for tailoring antenna systems to different classes of IoT devices, taking into account use-case scenarios, environmental limitations, and autonomy requirements.

**Keywords:** IoT devices, energy efficiency, antenna systems, metamaterials, digital twin, self-tuning, low-power communication.

### Вступ

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) вносить кардинальні зміни у сучасну технологічну екосистему, забезпечуючи безперервну взаємодію мільярдів пристроїв у реальному часі. У таких сферах, як енергетика, медицина, сільське господарство, логістика та міська інфраструктура, ключову роль відіграють компактні бездротові вузли, здатні функціонувати автономно протягом тривалого часу [1-4]. Проте ефективність цих пристроїв суттєво залежить від здатності до енергоощадного обміну даними в умовах обмежень на рівень енергоспоживання та мінливого зовнішнього середовища [5]. Зважаючи на те, що антенна система, як базовий компонент комунікаційної підсистеми, має забезпечити не лише якісний зв'язок, а й сприяти зниженню загального енергоспоживання, проблема розробки енергоефективних антен для IoT-пристроїв набула особливої ваги, а необхідність її вирішення обумовлює *високу актуальність* теми дослідження.

*Аналіз наукових публікацій*, присвячених розвитку енергоефективних рішень для Інтернету речей, свідчить про зростання інтересу до антенних систем як ключового чинника забезпечення низького енергоспоживання у бездротових IoT-пристроях [1-5]. Сучасні дослідження зосереджені на компактных антенах, сумісних із протоколами LoRa, Zigbee, NB-IoT, а також на структурних інноваціях, як то метаантенах, фрактальних топологіях та реконфігурованих архітектурах [6-9]. При цьому розглядаються підходи до зниження втрат за рахунок точного узгодження імпедансу, використання високодіелектричних матеріалів та мінімізації паразитних ефектів [10-12]. Останніми роками спостерігається продуктивність використання антен з функцією енергозбирання та до інтегрованих рішень, що поєднують функції прийому, випрямлення та зберігання енергії [13-15]. Також зазначається актуальність задачі адаптації антен до змін середовища з використанням MEMS-технологій та алгоритмів машинного аналізу [16-18]. Крім того, проведений аналіз вказує на активний розвиток методів чисельного моделювання та проектування цифрових двійників, що дозволяє підвищити ефективність розробки та скоротити цикл проектування [19-21]. Попри значну кількість досліджень, присвячених проектуванню окремих типів антен для IoT-пристроїв, цілісного методологічного підходу до побудови енергоефективних антенних систем, які враховують весь цикл, що розглядається як *невирішена частина дослідження*.

Таким чином, *метою дослідження* є формування цілісної методології побудови енергоефективної антенної підсистеми для IoT-пристроїв, яка включає класифікацію вимог за сценаріями застосування, аналіз конструктивних рішень, оцінку впливу середовища, підбір методів

моделювання та тестування, а також узагальнення критеріїв оптимізації для забезпечення стабільного зв'язку при мінімальному енергоспоживанні.

## Результати

*Постановка задачі оптимізації антенних систем у відповідності до показників енергоспоживання.* У багатьох прикладних сценаріях використання IoT-систем критично важливими стають мінімальні енергетичні витрати як на рівні обробки даних, так і на рівні передачі сигналу. Антенна підсистема відіграє при цьому подвійну роль: як канал зв'язку з навколишнім середовищем і як елемент, що істотно впливає на загальний енергетичний профіль пристрою. Успішна оптимізація антенних рішень для IoT залежить від врахування контексту застосування, конструктивних обмежень, протокольних вимог і потенціалу інтеграції з сучасними технологіями енергозбереження. Таким чином, обґрунтоване формулювання задачі передбачає системний аналіз прикладних сценаріїв, технічних вимог і характеристик антен, які забезпечують ефективну взаємодію у середовищі з обмеженням на енергоспоживання [5-9].

Сценарії застосування IoT-пристроїв охоплюють широке коло галузей у яких вирішальне значення мають такі показники як автономність роботи, енергоефективність окремих компонентів, стабільність бездротового зв'язку та здатність до передачі даних за умов обмеженого енергоживлення і змінного середовища (рис. 1).

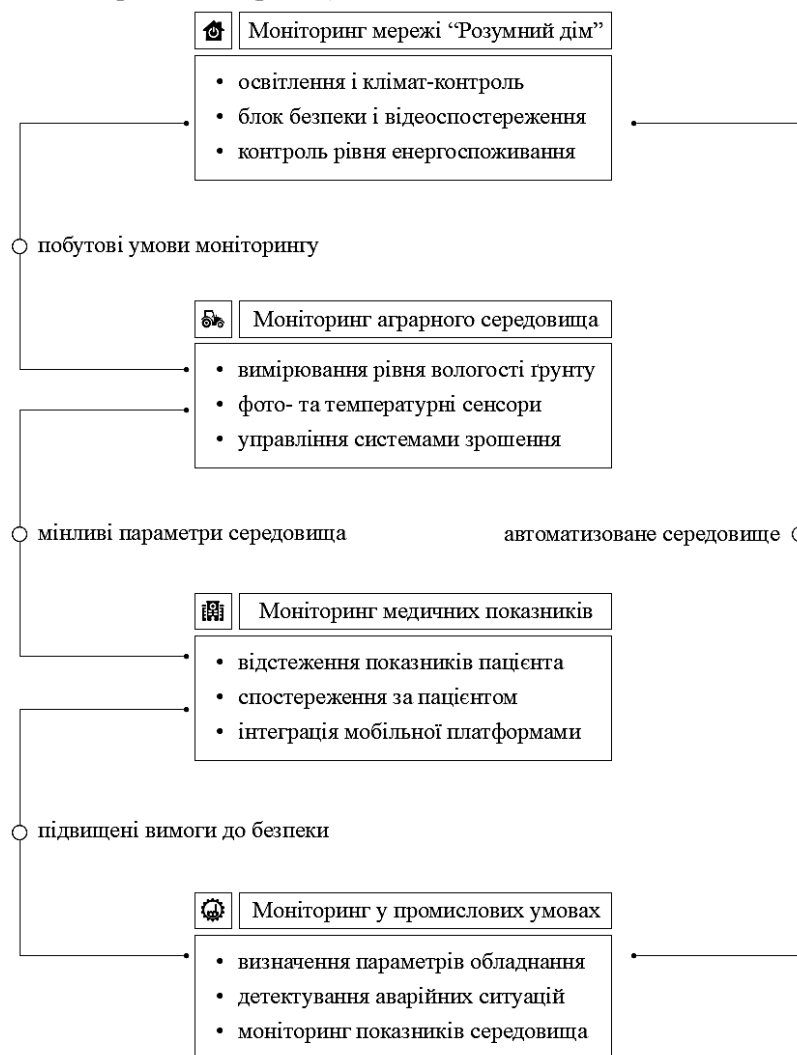


Рис. 1. Структуризація галузей застосування IoT-моніторингу

Серед найбільш типових застосувань у рамках дослідження пропонується виділити такі категорії як: (i) проектування комплексів типу «розумний дім» (Smart Home, SmH), де антенні системи мають забезпечувати стабільну комунікацію у внутрішньому середовищі приміщень, а енергоспоживання відіграє ключову роль у визначенні тривалості автономної роботи сенсорів [22]; (ii) агромоніторинг (Smart Agriculture, SmA), де IoT-пристрої застосовуються для вимірювання вологості ґрунту, рівня освітленості, стану рослин та контролю систем зрошення, а передача даних здійснюється на великі відстані в умовах відсутності інфраструктури енергоживлення [23]; (iii) медичний моніторинг (Health Remote Monitoring, HRM), де антенні модулі повинні відповідати вимогам біосумісності, мінімального тепловиділення і безперервного енергоефективного зв'язку в межах тіла або поблизу нього, часто в умовах складної радіочастотної взаємодії з тканинами [24]; (iv) промисловий моніторинг (Industrial Monitoring, InM), де відповідні системи функціонують у складних умовах з електромагнітними перешкодами, вібраціями та металевими конструкціями, що впливають на якість сигналу, а отже антени повинні бути надійними, компактними та здатними до роботи у широкому температурному діапазоні [25].

З огляду на високу актуальність підвищення енергоефективності антенної підсистеми в умовах обмежених ресурсів IoT-пристроїв, постає необхідність чіткого формулювання задач дослідження, орієнтованих на зниження енергоспоживання, мінімізацію габаритів, забезпечення стабільного зв'язку та адаптивність до умов експлуатації. У цьому контексті на даному етапі дослідження мають бути визначені аспекти, які потребують системного аналізу та подальшої оптимізації:

Обмеження щодо енергоспоживання [1-4], габаритних розмірів і вартості. Сучасні IoT-сценарії накладають жорсткі обмеження на компоненти антенної підсистеми, зокрема щодо мінімізації енергоспоживання, зменшення габаритів та здешевлення виготовлення. Ці параметри мають вирішальне значення при масовому виробництві сенсорних вузлів для агромоніторингу, побутових систем і мобільних пристроїв, де критично важлива тривала автономна робота. Забезпечення балансу між компактністю, вартістю та ефективністю роботи потребує чіткої систематизації вимог у відповідності до протоколу зв'язку.

Визначення вимог до антен у контексті розробки IoT-протоколів [6]. При побудові сучасних IoT-протоколів висуваються специфічні вимоги до антен, що працюють у вузькому частотному діапазоні, часто в умовах високого загасання або нестабільного каналу. При цьому необхідно досягти мінімального рівня енергоспоживання при збереженні достатньої дальності зв'язку та стійкості сигналу.

Проектування компактних малопотужних антен [9]. Посеред найбільш поширених рішень щодо фізичного втілення антен у компактних IoT-пристроях можна виокремити друковані антени, інверсні F-антени та планарні інверсні F-антени. У основі проектування лежить компроміс між розмірами та вартістю виробництва, за умов дотримання вимог щодо мінімального коефіцієнту підсилення.

Синтез метаматеріалів та фрактальних структур для підвищення ККД системи [8]. Нарощування ефективності в обмеженому об'ємі вимагає впровадження інноваційних підходів до геометрії антен. Структури на основі метаматеріалів дають змогу сформувати штучні властивості ефективної діелектричної проникності або магнітної сприйнятливості, що покращує резонансні характеристики. Фрактальні структури, у свою чергу, дозволяють збільшити довжину ефективного струмового шляху без збільшення фізичних розмірів антени.

Проектування антен зі змінною конфігурацією (Reconfigurable Antennas, RCA) [7]. Особливий інтерес викликають реконфігуровні антени, здатні змінювати свої характеристики залежно від умов навколишнього середовища або режиму роботи пристрою. Такі системи можуть реалізовуватись шляхом перемикання довжин провідників, використання тунінгових елементів та зміни форми антени, що відкриває шлях до створення мультипротокольних IoT-пристроїв.



Рис. 2. Структурна схема постановки задачі проектування енергоефективної антенної підсистеми для IoT-пристроїв

Узагальнення основних вимог до антенних систем для IoT-пристроїв дозволяє сформувати цілісну структуру задач дослідження, орієнтовану на досягнення енергоефективності при збереженні якості зв'язку. Запропонована схема постановки задач (рис. 2) демонструє взаємозв'язок між вимогами до пристроїв і технічними рішеннями, що відкриває перспективи для подальшої оптимізації антенної підсистеми з урахуванням умов експлуатації.

Комплексна методика мінімізації втрат та оптимізації енергоспоживання антенних систем. Як показав проведений аналіз, забезпечення енергоефективної роботи IoT-пристроїв передбачає не лише оптимізацію антенної архітектури, але й впровадження цілого комплексу технічних рішень, спрямованих на мінімізацію втрат при передачі та прийомі сигналу. Враховуючи високу залежність параметрів енергоспоживання від електрофізичних властивостей матеріалів, точності узгодження антен з навантаженням, конструкції схем живлення та потенціалу збору навколишньої енергії, важливим завданням стає інтеграція антенних систем із низьковитратними компонентами та технологіями енергозбереження. У цьому контексті ключову роль відіграють методи зменшення коефіцієнта відбиття, вибір діелектриків із покращеними характеристиками, узгодження з енергоощадними мікроконтролерами, а також реалізація функцій збору і перетворення енергії, що випромінюється у вигляді радіочастотних (Radio Frequency, RF) електромагнітних хвиль.

Комплексне поєднання антен, випрямлячів та накопичувачів відкриває нові перспективи для підвищення автономності IoT-пристроїв навіть в умовах обмеженого зовнішнього живлення. Таким чином, подальший аналіз має бути зосереджено на методах, що безпосередньо впливають на зниження енергетичних втрат та забезпечують оптимізацію системної взаємодії антенного модуля з іншими функціональними блоками пристрою.

Однією з основних передумов енергоефективної роботи антенної підсистеми є мінімізація втрат, пов'язаних із невідповідністю імпедансів між антеною та електронними модулями IoT-пристрою. В умовах низького енергетичного бюджету навіть незначне підвищення коефіцієнта відбиття призводить до суттєвого зниження ефективності передачі сигналу, зростання енергоспоживання і зменшення стабільності зв'язку. Як показує аналіз сучасних досліджень, особливо актуальним є точне узгодження антенних елементів з мікроконтролерами, модулями передавачів і випрямлячами енергії у схемах збору RF-енергії. Формалізація на математичному рівні, що проводиться у рамках дослідження, визначає узгодження імпедансу як ефективність передачі електромагнітної енергії від джерела сигналу до навантаження без втрат на відбиття [10-12]. Умова ідеального узгодження визначається у відповідності до комплексного імпедансу антени  $Z_A$ , комплексного імпедансу навантаження  $Z_L$  і комплексно спряженого значення  $Z_L^*$ . Відповідно, коефіцієнт відбиття  $\Gamma$  та рівень втрат на відбиття  $|\Gamma|^2$  визначається як:

$$\begin{cases} \Gamma = \frac{Z_A - Z_L}{Z_A + Z_L} \\ \Gamma^2 = \left( \frac{Z_A - Z_L}{Z_A + Z_L} \right)^2 \end{cases} \quad (1)$$

Це дозволяє ввести коефіцієнт стоячої хвилі напруги (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR), пов'язаний з енергетичними втратами  $\kappa_{VSW} = (1 + |\Gamma|)/(1 - |\Gamma|)$ . У рамках дослідження пропонується використовувати цю формалізацію як основу для побудови критеріїв узгодження при моделюванні енергоефективних IoT-пристроїв через введення інтегрального критерію ефективності узгодження на основі усереднення в робочому частотному діапазоні пристрою:

$$\langle |\Gamma| \rangle = \frac{1}{\Delta f} \int_{f_1}^{f_2} |\Gamma(f)| df, \quad (2)$$

що пропонується використовувати як цільову функцію при оптимізації геометрії антени та вибору матеріалів. Такий підхід дозволяє адаптувати антенну систему не лише до точкового узгодження, а й до стабільної роботи в умовах змінної частоти та імпедансу навантаження, що особливо актуально при моделюванні сценаріїв використання IoT-пристрою з багатоканальним зв'язком або змінними умовами живлення. Водночас, для врахування впливу паразитних ємностей і індуктивностей у конструкції антени при моделюванні повного імпедансного профілю у якості першого наближення, в рамках макромоделі можна описати імпеданс антени як:

$$Z_A(f) = R + j \cdot \left( 2\pi \cdot fL - \frac{1}{2\pi \cdot fC} \right), \quad (3)$$

де  $R$ ,  $L$ ,  $C$  — параметри моделі з урахуванням паразитних елементів. На основі відповідного математичного апарату у рамках формування методологічних рекомендацій пропонується розглядати не лише одينية узгодження в точці резонансу, але й стійкість імпедансного профілю в умовах змін навантаження, температури та частоти. Це дає змогу збільшити загальну енергетичну ефективність без потреби у впровадженні складних реконфігурованих схем.

Одним із напрямів підвищення ефективності антенних систем для IoT-пристроїв є застосування матеріалів з високою діелектричною проникністю (High-Permittivity Dielectrics, HPD), що дозволяє суттєво зменшити фізичні розміри антени без погіршення її резонансних характеристик. Згідно з базовим співвідношенням для довжини хвилі в середовищі  $\lambda_D = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r}$ , де величина  $\lambda_D$  є довжиною хвилі в діелектрику,  $\lambda_0$  — довжина хвилі при розповсюдженні у вакуумі,  $\epsilon_r$  — відносна діелектрична проникність матеріалу. Зростання  $\epsilon_r$  дає змогу реалізувати антену меншого розміру на задану робочу частоту, що особливо важливо в умовах мініатюризації пристроїв. У рамках дослідження пропонується оцінювати ефективність застосування діелектриків через співвідношення  $\epsilon_r / \tan \delta$ , де  $\tan \delta$  — тангенс кута діелектричних втрат. Такий підхід дозволяє збалансувати мініатюризацію та мінімізацію втрат у робочому діапазоні. Високі значення  $\epsilon_r$  із низькими втратами сприяють не лише зменшенню розмірів антени, але й покращенню її добротності та стабільності імпедансного профілю. У відповідності до математичної моделі можна вказати на перспективність застосування керамічних матеріалів на основі титанатів [26] та наноструктурованих композитів [27], які забезпечують контрольовану діелектричну поведінку при збереженні технологічної сумісності.

Характерно, що ефективність антенної підсистеми не може розглядатися ізольовано від електронної інфраструктури IoT-пристрою, зокрема мікроконтролера та енергетичної схеми [1, 22-24]. Невідповідність між електричними характеристиками антени та вхідним імпедансом радіомодуля або мікропроцесора призводить до зайвих втрат при комутації, передачі та прийомі сигналу. У рамках дослідження комплексна оптимізація антенного і мікропроцесорного рівнів за такими параметрами, як рівень логічного порогу, внутрішній опір навантаження передавача та режим роботи мікроконтролера. Крім того, інтеграція з LDO-регуляторами (Low-Dropout, LDO), перетворювачами з керуванням навантаженням, а також енергоощадними схемами [1, 22] дозволяє суттєво скоротити пікові та середні витрати енергії при збереженні працездатності антенного вузла. У запропонованій методології передбачається включення модуля керування енергоспоживанням до загальної моделі антенної підсистеми для забезпечення цілісного аналізу втрат і оптимізації автономності пристрою.

Сучасні антенні системи для IoT-пристроїв все частіше виконують не лише функцію передавання й приймання сигналів, але й відіграють активну роль у накопиченні енергії у радіочастотному діапазоні (RF Energy Harvesting, RG-EH). Впровадження RF-EH передбачає використання наявних джерел електромагнітного випромінювання для перетворення частини хвильової енергії у корисний електричний струм, придатний для живлення мікроконтролера або заряджання накопичувача [13-15]. Основна роль антени в таких системах полягає у забезпеченні максимальної ефективності збору енергії у заданому частотному діапазоні. Для цього формується енергетично-оптимізована топологія, орієнтована не лише на коефіцієнт посилення, а й на стабільність імпедансного профілю при змінному навантаженні, що характерно для випрямлячів. Енергія, зібрана антеною, подається на RF-випрямляч з подальшою передачею на накопичувальний елемент, як то конденсатор або мікроакумулятор. У рамках дослідження для побудови моделі оцінки пропонується використовувати коефіцієнт корисного збору як системний показник, що включає в себе ефективність антени, випрямляча та втрати на узгодження, що формалізується як:  $\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{ant}} \cdot \eta_{\text{match}} \cdot \eta_{\text{rect}}$ , де  $\eta_{\text{ant}}$  — ефективність антени,  $\eta_{\text{match}}$  — коефіцієнт узгодження,  $\eta_{\text{rect}}$  — ефективність випрямлення. Такий підхід дозволяє розглядати антену як активний елемент енергетичної підсистеми IoT-пристрою та оптимізувати її конструкцію як у відповідності задачі ефективності передачі даних, так і з урахуванням функцій RF-EH, особливо у випадках безперервного пасивного моніторингу.

*Особливості впровадження адаптивних підходів при оптимізації енергоспоживання антенних систем.* Попередній аналіз засвідчив, що ефективність антенної підсистеми IoT-пристрою визначається не лише конструктивними параметрами, топологією та схемними рішеннями, а й стабільністю роботи у реальних умовах експлуатації. Навіть налаштована антена може демонструвати суттєве зниження продуктивності внаслідок впливу змін середовища, як то

температура, вологість, положення пристрою, наближені об'єкти або зміна діелектричних властивостей навколишнього простору [6, 24]. Ці чинники призводять до зсуву резонансної частоти, зміни вхідного імпедансу, зниження коефіцієнта підсилення та росту втрат на відбиття, що зменшує дальність зв'язку й збільшує енергоспоживання. У зв'язку з цим виникає необхідність оцінки чутливості антен до параметрів середовища та впровадження адаптивних механізмів компенсації, здатних підтримувати оптимальні характеристики системи в умовах динамічно змінюваного оточення. На сучасному етапі розвитку технологій така адаптація може реалізовуватись як на апаратному рівні, через використання MEMS-елементів, варикапів або тюнінгових контурів, так і на алгоритмічному рівні шляхом застосування методів машинного навчання, які прогнозують зміну параметрів та ініціюють перебудову системи в режимі реального часу [6, 20].

Орієнтація антени відносно базової станції або інших елементів мережі визначає поляризаційний зв'язок і кут падіння електромагнітної хвилі, що напряму впливає на коефіцієнт підсилення. Основним математичним показником тут є кутовий коефіцієнт підсилення  $G(\theta, \phi)$  на основі зенітного кута  $\theta$  та азимуту  $\phi$ . Втрата узгодження при неправильній орієнтації оцінюється через коефіцієнт втрат на поляризацію, що визначається через  $\log_{10} \cos|\alpha|$ , де  $\alpha$  є кутом між векторами поляризації передавача і приймача.

Подібним чином, температурні коливання змінюють електрофізичні властивості матеріалів, зокрема відносну діелектричну проникність  $\epsilon_r(T)$  і питомий опір провідників, що призводить до зміни резонансної частоти  $f_0$  та добротності  $Q$ . Залежність  $\epsilon_r$  від температури може бути апроксимована лінійно у вузькому діапазоні:

$$\epsilon_r(T) = \epsilon_r^0 \cdot (1 + \alpha_T \cdot (T - T_0)), \quad (4)$$

де  $\epsilon_r^0$  — проникність при базовій температурі,  $\alpha_T$  — температурний коефіцієнт. Зсув резонансної частоти оцінюється через:

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} \cong -\frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta \epsilon_r}{\epsilon_r}. \quad (5)$$

Поглинання водяної пари змінює ефективну діелектричну проникність середовища навколо антени, що особливо критично для систем, розміщених у біологічному середовищі або на відкритому просторі. При цьому паразитна провідність вологих матеріалів збільшує втрати. Для опису цього ефекту доцільно враховувати комплексну проникність  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ , причому  $\epsilon''$  розраховується через співвідношення  $\sigma / (2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0)$ , де  $\sigma$  — електропровідність, яка зростає з вологістю,  $f$  — частота сигналу,  $\epsilon_0$  — константа, що відповідає показнику проникності для вакууму.

Зважаючи на змінність параметрів середовища та непередбачуваність умов експлуатації, дедалі більшого значення набувають методи автоналаштування антенних систем, які дозволяють зберігати ефективність роботи без втручання користувача. У фізичному аспекті найбільш розповсюдженими є рішення на базі варикапів і MEMS-компонентів, що дають змогу динамічно змінювати резонансну частоту, імпеданс або добротність за рахунок перебудови топології або електричних параметрів. Зокрема, ємність варикапа  $C(V)$  залежить від керуючої напруги  $V$ , що дозволяє змінювати частотну характеристику без порушення структурної цілісності пристрою. Разом з апаратними рішеннями у методику у методику впровадження адаптивних підходів включаються алгоритмічні методи автоналаштування на основі машинного навчання, які здійснюються машинний аналіз параметрів середовища у режимі реального часу з метою виявлення змін характеристик каналу та генерують керуючі сигнали для адаптації антени. У рамках дослідження, таким чином, пропонується використовувати гібридний підхід: апаратне автоналаштування з електронним керуванням, підсилене адаптивним алгоритмом, що враховує послідовність вхідних даних, тренди змін та робоче



середовище. Такий підхід дозволяє досягти енергоефективної стабільності у динамічному середовищі без значного ускладнення архітектури IoT-пристрою.

Нарешті слід зазначити, що у розподілених IoT-системах, де велика кількість вузлів функціонує в неоднорідному середовищі з різними рівнями шуму, перешкод і доступності енергії, адаптація антенної підсистеми до змін умов роботи є критичною умовою підтримання стабільного зв'язку та енергоефективності. Така адаптація має включати як локальні механізми перебудови параметрів, так і глобальну координацію у межах мережі, з урахуванням змін конфігурації маршрутизації, передачі даних і пріоритетів. У рамках дослідження пропонується модель контекстно-орієнтованої адаптації, в якій кожен вузол виконує локальний моніторинг середовища та формує набір параметрів, які автоматично оновлюються відповідно до ситуації. Зокрема, в умовах високого рівня перешкод можливе зниження частоти опитування, перебудова резонансної частоти або перехід до альтернативного протоколу зв'язку. У разі зниження напруги живлення система може активувати режим зменшеної потужності з використанням вузькосмугових налаштувань антени. Таким чином, адаптивна антенна підсистема у розподіленому середовищі має бути тісно інтегрована з мережею керування енергоспоживанням і обміном даних, що відкриває шлях до побудови автономних, IoT-мереж з самоналаштуванням параметрів та високою стабільністю.

*Методологія моделювання, тестування та оптимізації антенних систем.* Комплексність завдань, пов'язаних з проектуванням енергоефективної антенної підсистеми для IoT-пристроїв, потребує не лише теоретичної розробки конструктивних і адаптивних рішень, але й застосування достовірних інструментів чисельного моделювання, цифрового моделювання та експериментального тестування. Враховуючи високі вимоги до точності, швидкодії та масштабованості, сучасні підходи до верифікації антенних рішень передбачають багаторівневу методологію, яка поєднує аналітичні моделі, тривимірну елементну симуляцію, цифрових двійників та натурні випробування в умовах реального навантаження. Комплексний підхід забезпечує не лише формування повноцінної моделі поведінки антенної системи, але й створює підґрунтя для розробки рекомендацій з її оптимізації під конкретні сценарії застосування IoT-пристроїв.

Таким чином, для оцінки електромагнітних характеристик антенних структур в умовах складної геометрії, неоднорідного середовища та наявності паразитних елементів, ключову роль відіграють методики чисельного моделювання, які дозволяють отримати просторово-часовий розподіл поля, оцінити коефіцієнт відбиття, діаграму спрямованості, імпедансну відповідність і рівень втрат. Найбільш поширеними у математичному моделюванні антен для IoT-пристроїв є наступні підходи:

Метод скінченних різниць в часовій області (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) використовується для моделювання поведінки RF-хвиль у часовій області, ефективно відстежуючи динамічні процеси, включаючи збудження імпульсними джерелами. Основними перевагами методу FDTD є хороша масштабованість до 3D-моделей і висока точність при нестационарному впливі.

Метод скінченних елементів (Finite Element Method, FEM) використовується для розв'язання крайових задач у частотній області, забезпечує високу точність у випадках складної геометрії та матеріалів із анізотропією при локальному уточненні розподілу поля.

Метод зважених залишків (Method of Weighted Residuals, MWR) використовується при аналізі відкритих провідникових структур, зокрема, параметрів поверхневих струмів антен та визначення вхідного імпедансу.

У рамках дослідження пропонується введення показників ефективності моделювання, які дозволяють не лише оцінити точність симуляцій, але й визначити доцільність обраного методу у контексті енергоощадного проектування:

- похибка резонансної частоти відносно експерименту  $\varepsilon_f$ ;
- ефективність моделювання, як відношення часу симуляції до кількості елементів сітки  $\eta_{sim}$ , що розглядається як індикатор обчислювальної складності;

- максимальне відхилення імпедансу у робочому діапазоні  $\Delta Z_{max}$ .

Використання відповідних показників дозволяє обґрунтовано обирати метод моделювання залежно від типу антени, сценарію застосування та доступного обчислювального ресурсу, що особливо важливо для оптимізації розробки в умовах обмеженого часу та енергетичного бюджету.

Також сучасні підходи до розробки IoT-пристроїв передбачають використання цифрових двійників, як віртуальних копій фізичних систем, які дозволяють у режимі реального часу моделювати, аналізувати та прогнозувати поведінку антенної підсистеми з урахуванням динамічних змін середовища, навантаження та режимів роботи. У поєднанні з моделями енергоспоживання це створює умови для всебічної оцінки впливу конструктивних та програмних рішень на загальний енергетичний профіль пристрою. У рамках дослідження цифровий двійник описується як мультифізична модель, що поєднує наступні категорії:

- електромагнітні характеристики антени;
- електричну модель енергоспоживання;
- адаптивна логіка перемикавання режимів.

Основним показником ефективності цифрового двійника пропонується вважати похибку прогнозування енергоспоживання  $\delta E = |E_{sim} - E_{exp}|/E_{exp}$ , де  $E_{sim}$  — математично змодельований рівень електроспоживання, а  $E_{exp}$  відповідає експериментальному значенню. Такий підхід дозволяє провести тестування і оптимізацію антенно-енергетичної поведінки IoT-пристрою до виготовлення фізичного зразка, що скорочує час розробки та підвищує якість моделювання.

Нарешті, експериментальна верифікація є ключовим етапом у підтвердженні ефективності проєктованої антенної системи в контексті енергообмежених IoT-пристроїв, де традиційні стендові методи є менш репрезентативними. Для цієї мети застосовуються вимірювальні конфігурації з мінімальним споживанням енергії (Low-Power Measurement Setups, LPMS), що дають змогу реєструвати параметри антени в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації.

Такі стенди дозволяють оцінювати наступні параметри:

- імпеданс та  $K_{VSW}$  у малопотужному режимі;
- стабільність сигналу при перемиканні енергетичних станів;
- часова залежність для показників потужності передачі сигналу  $P_{Tx}(t)$  та потужності прийому сигналу  $P_{Rx}(t)$ .

Вимірювання безпосередньо в цільовому середовищі дає змогу виявити нелінійні впливи, паразитні взаємодії та зміни параметрів, які не можуть бути точно змодельовані чисельно. У рамках дослідження наголошується на важливості інтеграції результатів тестування з цифровими двійниками, що дозволяє періодично коригувати модель на основі польових даних і забезпечувати адаптивне планування життєвого циклу пристрою з урахуванням реальних умов експлуатації.

## Висновки

В результаті проведеного дослідження було визначено технічні аспекти розробки та оптимізації енергоефективних антенних систем для IoT-пристроїв, які функціонують в умовах обмеженого енергоживлення, складного середовища та високих вимог до автономності. Враховуючи зростаючу роль бездротового зв'язку у сфері розумного дому, агромоніторингу, медицини та промисловості, ключовим завданням стало формування цілісної методології, що охоплює архітектуру антен, матеріали, адаптивні механізми та засоби чисельного й експериментального моделювання.

Основні результати дослідження включають у себе наступні категорії:

Систематизовано вимоги до антенних систем IoT-пристроїв відповідно до сценаріїв застосування, з урахуванням енергоспоживання, габаритів, вартості та умов середовища.

Проаналізовано методи мінімізації втрат, включаючи оптимізацію узгодження імпедансу, застосування діелектричних матеріалів з високою проникністю, інтеграцію з енергоощадними мікроконтролерами та схемами живлення, впровадження принципів збору радіочастотної енергії;

Формалізовано критерії енергетичної ефективності на основі коефіцієнта відбиття, середньої ефективності узгодження та коефіцієнта корисного збору енергії.

Обґрунтовано доцільність використання адаптивних антен, здатних до самоналаштування в умовах змін температури, вологості та просторового положення, з використанням MEMS-елементів, варикапів і алгоритмів машинного навчання.

Сформовано підхід до контекстно-орієнтованої адаптації в розподілених IoT-мережах, що передбачає перебудову параметрів антени залежно від умов мережі, енергетичного стану та зовнішнього впливу.

Проведено аналіз методів чисельного моделювання, запропоновано індикатори ефективності симуляцій та введено показники похибки прогнозування енергоспоживання. Розроблено концепцію цифрового двійника антенної підсистеми, що об'єднує електромагнітну, енергетичну та адаптивну моделі, з можливістю валідації на основі тестування в реальному середовищі.

Отримані результати мають прикладне значення для інженерного проектування IoT-пристроїв нового покоління, забезпечуючи зниження енергоспоживання, підвищення стабільності зв'язку та розширення автономності без підвищення вартості.

### Список використаних джерел

1. Kanoun, O., Bradai, S., Khriji, S., Bouattour, G., El Houssaini, D., Ben Ammar, M., Naifar, S., Bouhamed, A., Derbel, F., & Viehweger, C. (2021). Energy-aware system design for autonomous wireless sensor nodes: A comprehensive review. *Sensors*, 21(2), 548. <https://doi.org/10.3390/s21020548>.
2. Ruiz-Garcia, L., Lunadei, L., Barreiro, P., & Robla, I. (2009). A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: State of the art and current trends. *Sensors*, 9(6), 4728–4750. <https://doi.org/10.3390/s90604728>.
3. Smith, J., & Colleagues (2025). A review on WSN-based resource constrained smart IoT systems. *International Journal of Emerging Technology and Smart Systems*, 1(1), Article 52. <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00152-2>.
4. Gupta, D., Wadhwa, S., Rani, S., Khan, Z., & Boulila, W. (2023). EEDC: An Energy Efficient Data Communication Scheme Based on New Routing Approach in Wireless Sensor Networks for Future IoT Applications. *Sensors*, 23(21), 8839. <https://doi.org/10.3390/s23218839>.
5. Li, Y., Xu, J., Liu, W., Zhang, X., & Chen, J. (2023). Dynamic resource optimization for energy-efficient 6G-IoT ecosystems: Joint subchannel and power allocation. *Sensors & Actuators A: Physical*, 345, 114075. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114075>.
6. Khan, S., Mazhar, T., Shahzad, T., Bibi, A., Ahmad, W., Khan, M. A., Saeed, M. M., & Hamam, H. (2024). Antenna systems for IoT applications: A review. *Discover Sustainability*, 5, Article 412. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00638-z>.
7. Musa, N. B. Nor, Cheab, S., & Prog. Electromagn. Res. M. (2023). A compact reconfigurable multi-frequency patch antenna for LoRa IoT applications. *Progress in Electromagnetics Research M*, 116, 77–89. <https://doi.org/10.2528/PIERM23021804>.
8. Hussain, M., Awan, W. A., Alzaidi, M. S., Hussain, N., Ali, E. M., & Falcone, F. (2023). Metamaterials and their application in the performance enhancement of reconfigurable antennas: A review. *Micromachines*, 14(2), Article 349. <https://doi.org/10.3390/mi14020349>.
9. Prakash, R. O., Yadav, C. S., Yadava, R. L., & Yadav, R. K. (2022). Low profile and wideband antennas for IoT applications. In *Proceedings of the Advancement in Electronics & Communication Engineering*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4157584>.
10. Pello-Oquendo, A., Sotelo, E., & López-Aguilera, E. (2022). On theoretical methods for impedance matching in Internet of Things antenna systems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(11), 8265–8274. <https://doi.org/10.1109/TAP.2022.3187653>.

11. Mitra, P., & Knox, A. (2024). Critical factors in RF PCB design: material selection and impedance matching for low-loss performance. *Journal of RF Engineering*, 12(4), 45–59.
12. Soriano, J., & Pérez, R. (2023). Resonator-loaded patch antennas: effects of dielectric properties on impedance matching and bandwidth. *Electronics*, 12(8), 1521. <https://doi.org/10.3390/electronics12081521>.
13. Guerrero-Vásquez, L. F., Chacón-Reino, N. A., Tenezaca-Angamarca, S. D., Chasi-Pesantez, P. A., & Ordoñez-Ordoñez, J. O. (2025). Advancements in antenna and rectifier systems for RF energy harvesting: A systematic review and meta-analysis. *Applied Sciences*, 15(14), 7773. <https://doi.org/10.3390/app15147773>.
14. Prasad, L., Mohanta, H. C., & Al-Gburi, A. J. A. (2024). Dual-band rectenna for electromagnetic energy harvesting at 2.4 GHz and 5 GHz frequencies. *Progress in Electromagnetics Research B*, 108, 75–88. <https://doi.org/10.2528/PIERB24072102>.
15. Wagih, M., Weddell, A. S., & Beeby, S. (2017). Rectennas for RF energy harvesting and wireless power transfer: A review of antenna design. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(7), 3565–3578.
16. Guerrero-Vásquez, L. F., Chacón-Reino, N. A., Tenezaca-Angamarca, S. D., Chasi-Pesantez, P. A., & Ordoñez-Ordoñez, J. O. (2025). Advancements in antenna and rectifier systems for RF energy harvesting: A systematic review and meta-analysis. *Applied Sciences*, 15(14), 7773. <https://doi.org/10.3390/app15147773>.
17. Prasad, L., Mohanta, H. C., & Al-Gburi, A. J. A. (2024). Dual-band rectenna for electromagnetic energy harvesting at 2.4 GHz and 5 GHz frequencies. *Progress in Electromagnetics Research B*, 108, 75–88. <https://doi.org/10.2528/PIERB24072102>.
18. Wagih, M., Weddell, A. S., & Beeby, S. (2017). Rectennas for RF energy harvesting and wireless power transfer: A review of antenna design. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(7), 3565–3578. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2705784>.
19. Guo, X., Liu, L., Huang, J., Wang, H., Du, X., Shi, J., & Wang, Y. (2023). A digital twin modeling method for array antenna assembly performance analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(7-8), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11324-1>.
20. Nele, L., Mattera, G., Yap, E. W., Vozza, M., & Vespoli, S. (2024). Towards the application of machine learning in digital twin technology: A multi-scale review. *SN Applied Sciences*, 6, Article 6206. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06206-4>.
21. Thelen, A., Zhang, X., Fink, O., Lu, Y., Ghosh, S., Youn, B. D., Todd, M. D., & Mahadevan, S. (2022). A comprehensive review of digital twin — Part 1: Modeling and twinning enabling technologies. *arXiv*. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2208.14197>.
22. Pan, J., Chen, S. Z., Jain, R., & Paul, S. (2016). Energy sensing and monitoring framework with an integrated communication backbone in energy efficient intelligent buildings. *arXiv*. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/1603.08026>.
23. Nawaz, M., & Babar, M. I. K. (2025). IoT and artificial intelligence for smart agriculture in resource-constrained environments: Challenges, opportunities and solutions. *Computational Intelligence and Internet of Things*, 5, Article 24. <https://doi.org/10.1007/s43926-025-001193>.
24. Lee, S., & Paek, J. (2023). Wearable antenna design for wireless body area networks considering biosafety and low power consumption. *IEEE Access*, 11, 56782–56793. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3321234>.
25. Behești Asl, M., Fofana, I., & Meghnefi, F. (2024). Review of various sensor technologies in monitoring the condition of power transformers. *Energies*, 17(14), 3533. <https://doi.org/10.3390/en17143533>.
26. Zhang, M., Xu, P., Peng, H., & Qin, F. (2021). A rational design of core-shell-satellite structured BaTiO<sub>3</sub> fillers for epoxy-based composites with enhanced microwave dielectric

- constant and low loss. *Composites Part B: Engineering*, 229, 108764. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108764>.
27. Ganguly, P., Kumar, V., Maneesha, P., Ghosh, S., & Sen, S. (2024). Investigation of BaTiO<sub>3</sub>-NiO composite as compact dielectric resonator antenna. *arXiv preprint arXiv:2405.08910*.