

КІБЕРНЕТИКА та КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Open Access under [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) License

УДК 681.7.08:004.387:621.3.087.92

DOI:10.34229/2707-451X.26.1.5

Г.В. АНТОНОВА

КОМПЛЕКСНА КОНЦЕПЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Вступ. Протягом останнього десятиріччя бездротові сенсорні мережі (БСМ) активно впроваджуються в різних галузях промисловості. Галузева специфіка визначає не лише прикладні задачі БСМ, а й визначає середовище розгортання, тип і конфігурацію мережі. Характерною особливістю таких систем є використання автономних джерел живлення з обмеженим енергетичним ресурсом. Забезпечення автономності вузлів протягом заданого терміну є критичною умовою стабільного функціонування мережі, що зумовлює пріоритетність дослідження процесів енергоспоживання.

Одним із базових методів дослідження є моделювання – математичне та емпіричне. Математичні моделі виступають універсальним інструментом прогнозування та розв'язування інженерних задач на їх основі. В свою чергу емпіричні моделі, що базуються на експериментальних даних і методах математичної статистики, дають змогу врахувати специфіку передавання даних в умовах конкретного рослинного середовища, а також описати ослаблення сигналу залежно від типу рослинного середовища та залежно від конфігурації мережі.

Однією з прикладних задач БСМ є моніторинг і експрес-діагностика стану сільськогосподарських рослин упродовж вегетаційного періоду. Забезпечення функціонування БСМ упродовж цього періоду та цілісності передавання даних до координатора за таких умов залежить від енергетичного балансу вузлів, надійності зв'язку та динамічних змін середовища розгортання. Отже, виникає потреба у комплексному дослідженні, що поєднує математичне й емпіричне моделювання енергетичного балансу БСМ з метою подальшого розроблення методів підвищення їх енергоефективності.

Мета роботи – розроблення комплексної концепції моделювання енергоспоживання БСМ, яка передбачає створення багатофакторної прогностичної математичної моделі та подальшу побудову на її основі динамічної моделі оцінювання енергоресурсу вузлів.

Концепція передбачає інтеграцію до динамічної моделі результатів синтезу теоретичних та емпіричних

Розглянуто процеси енергоспоживання бездротових сенсорних мереж у рослинному середовищі. Запропоновано комплексну концепцію моделювання, що включає багато-факторні моделі енергоспоживання БСМ (прогностичну та динамічну), модель ослаблення радіосигналу у рослинному середовищі типу "фруктовий сад" та модель адаптивної потужності. Представлена концепція забезпечує основу для підвищення енергоефективності БСМ.

Ключові слова: бездротові сенсорні мережі, бездротовий вузол, радіосигнал, ослаблення сигналу, енергоспоживання, моделювання, емпіричні моделі, енергоефективність, цифрове землеробство.

© Г.В. Антонова, 2026

підходів у вигляді моделі адаптивної потужності передавача, а також застосування добового коефіцієнта як додаткового інструмента оптимізації енергоефективності мережі в умовах рослинного середовища.

Аналіз моделей і методів дослідження енергоефективності БСМ. На початку 2000-х років основні зусилля дослідників у сфері БСМ були спрямовані на визначення фундаментальних параметрів енергоефективності. В 2002–2004 рр. встановлено, що оптимальна відстань передавання в один стрибок, яка мінімізує загальне енергоспоживання системи, залежить від умов поширення сигналу, а не від конкретної топології мережі [1]. Додатково було показано, що на оптимальний радіус передавання впливає щільність вузлів, а не площа покриття [2], а багатокроковий режим передавання даних є необхідним для забезпечення надійності у мережах із обмеженою дальністю передавання [3]. Динамічне керування живленням, зокрема вимикання вузлів під час простою з метою економії енергії [4, 5].

Подальший розвиток аналізу стосувався вдосконалення математичних інструментів. Для систем із сонячним живленням запропоновано аналітичні моделі організації черг на основі ланцюгів Маркова та теорії ігор для оптимізації стратегій сну/пробудження вузлів [6]. Системні підходи до аналізу протоколів маршрутизації визначають споживану та залишкову енергію як критичні змінні для проектування енергоефективних мереж [7]. У роботі [8] розглянуто методи збереження енергії в БСМ, які включають оптимізацію циклів сну/роботи, оптимізацію даних, маршрутів та радіообміну, а також апаратного забезпечення. У цій роботі представлена комплексна класифікація методів енергозбереження за напрямком їх дії. У роботі [9] представлено практичне забезпечення балансу між продуктивністю бездротових вузлів і споживанням енергії, емпірично визначено струм, напругу, та час окремих етапів роботи бездротового вузла.

У 2024–2025 рр. опубліковано низку робіт, у яких запропоновано аналітичні моделі енергоспоживання БСМ, однак більшість із них фокусуються на окремих компонентах енергобалансу. Так, у роботі [10] запропоновано модель енергозбору на основі сонячної інсоляції для вузлів точного землеробства, що описує добовий профіль накопичення та споживання енергії, проте не враховує комунікаційні витрати. У роботі [11] формалізовано енергію TX/RX, однак інші параметри – робота сенсора, переходи між режимами, розряд батареї, добові коливання доступної енергії – не включено до моделі. Отже, вона описує лише комунікаційну складову. У роботі [12] наведено узагальнені аналітичні моделі оцінювання ефективності ЕН-модулів і деградації акумулятора, проте їх інтеграцію з радіоканалом або динамікою зв'язку не здійснено.

Таким чином, аналіз літератури засвідчив, що наявні моделі враховують окремі компоненти енергобалансу – радіопередавання, енергозбір, фізичну деградацію джерел живлення – але не їхню взаємодію. Водночас комплексний підхід до моделювання енергоспоживання БСМ є необхідним для проектування та дослідження мереж, розгорнутих у польових сільськогосподарських умовах, де на енергоспоживання одночасно впливають нелінійність розряду батареї та ослаблення сигналу в рослинному середовищі.

Структуризація роботи бездротових вузлів. Функціонування бездротового вузла (БВ) ґрунтується на робочому циклі, який є послідовністю етапів із різним рівнем енергоспоживання. У межах цієї роботи робочий цикл пропонується поділити на два типи:

- неповний цикл БВ без проведення вимірювань, що складається з п'яти етапів: вихід із режиму сну, ініціалізація, вибір каналу, оцінювання чистоти каналу, режим сну;
- повний цикл БВ, який складається із семи етапів: вихід з режиму сну, ініціалізація, вибір каналу, оцінювання чистоти каналу, вимірювання, передавання даних та режим сну.

На відміну від існуючих підходів, у яких часто енерговитрати усереднюються, такий системний поділ дає змогу чітко розмежувати енерговитратні активні режими (вимірювання, передавання) і режими очікування. Така структуризація формує основу для побудови багатофакторної математичної моделі енергоспоживання, оскільки дозволяє коректно описати кожен цикл власним набором параметрів і враховувати різну частоту їх реалізації протягом вегетаційного періоду.

Енерговитратні етапи робочого циклу. Найбільш енерговитратними етапами робочого циклу є вимірювання та передавання даних [9], тому ці етапи доцільно розглянути детальніше.

Етап робочого циклу – вимірювання індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ). Коротко розглянемо процес вимірювання ІФХ. Згідно з методом ІФХ, світлодіод опромінює листок рослини світлом у синьому діапазоні спектра з довжиною хвилі 470 нм, що потребує безперервної подачі струму до світлодіода протягом процесу опромінювання. Типову спрощену структуру БВ для вимірювання ІФХ показано на рис. 1. Фотоприймач із червоним світлофільтром використовується для вимірювання ІФХ рослини в червоній або інфрачервоній ділянках спектра, що дає змогу точно фіксувати відгук на випромінювання листка та забезпечувати точне сприйняття флуоресцентного сигналу (на рисунку позначено зеленою стрілкою). Мікроелектронні компоненти, що входять до складу бездротового вузла, на рисунку об'єднані в єдиний блок пунктирною лінією. Компоненти живляться від вторинного джерела живлення, до якого енергія надходить від акумулятора – автономного джерела живлення, що позначено червоною стрілкою.

Далі розглянемо побудову моделі енергоспоживання БВ на етапі вимірювання ІФХ.

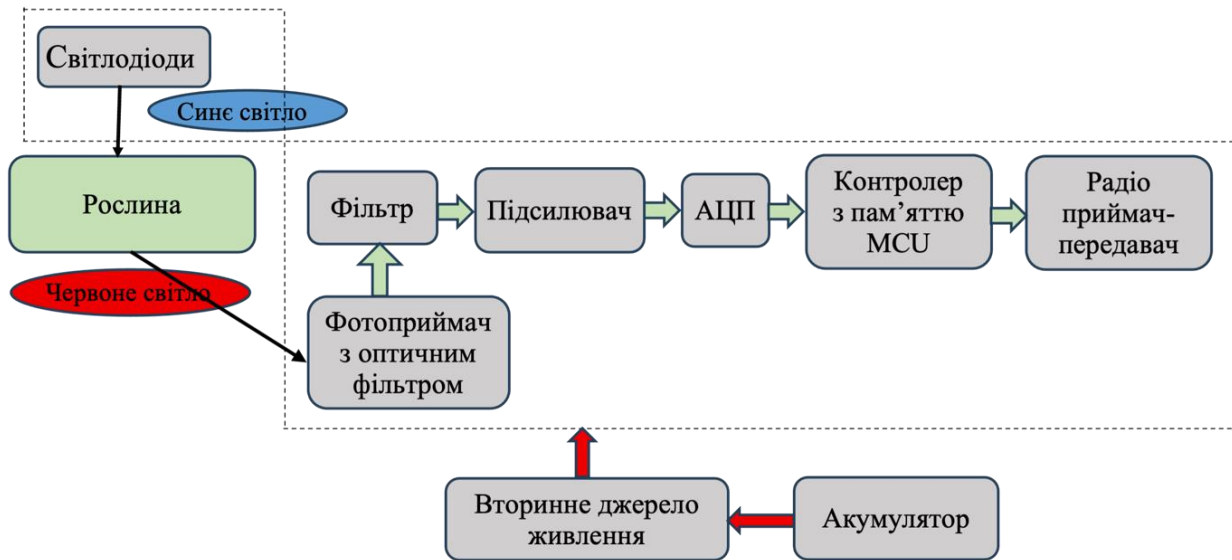


РИС. 1. Спрощена структура БВ для виміру ІФХ

Оцінка енергоспоживання БВ на етапі вимірювання ІФХ. Першим кроком побудови моделі є визначення енергоспоживання під час вимірювання. Відомо, що енергія визначається залежністю:

$$E = \int_0^T I(t) \cdot U(t) dt, \quad (1)$$

де $I(t)$ – струм у момент часу t ; $U(t)$ – напруга в момент часу t ; T – тривалість процесу.

За умови, що протягом короткочасного процесу вимірювання струм і напруга на мікроелементах є сталими, на основі виразу (1) пропонується визначити енергоспоживання БВ за один цикл вимірювання ІФХ:

$$E_{meas} = I_{total} \cdot U_{meas} \cdot \Delta t_e, \quad (2)$$

де I_{total} – загальний струм, який споживає БВ за один цикл вимірювання, мА; U_{meas} – робоча напруга живлення вузла, В, що відповідає вихідній напрузі вторинного джерела живлення; Δt_e – тривалість одного вимірювання, с.

Загальний струм, який споживає БВ за один цикл вимірювання, визначається як сума струмів мікроелектронних компонентів, що працюють одночасно:

$$I_{total} = I_{MCU} + I_{ACD} + (n \cdot (I_D + I_{driver})) + I_{DC/DC} + I_{PD}, \quad (3)$$

де I_{MCU} – струм, що споживає мікроконтролер у режимі вимірювання, мА;

I_{ACD} – струм, що споживає аналогово-цифровий перетворювач, мА;

I_D – струм, що забезпечує роботу одного світлодіода, залежить від типу світлодіода, мА;

n – кількість збуджуючих світлодіодів, шт;

I_{driver} – струм, що забезпечує роботу драйвера світлодіода, мА;

$I_{DC/DC}$ – струм, що забезпечує роботу DC/DC перетворювача, мА;

I_{PD} – струм фотодетектора, нА.

Струм фотодетектора визначається як сума темного струму та фотоструму: $I_{PD} = I_{dark} + (S \cdot P)$, де I_{dark} – темновий струм фотодетектора, нА; S – струмова чутливість фотодетектора, А/Вт, що залежить від типу фотодетектора та надається у специфікації; P – оптична потужність (світловий потік), Вт. Після підстановки (3) у формулу (2), отримано вираз для енергоспоживання БВ на етапі вимірювання:

$$E_{meas} = (I_{MCU} + I_{ACD} + (n \cdot (I_D + I_{driver})) + I_{DC/DC} + I_{PD}) \cdot U_{meas} \cdot \Delta t_{\theta}. \quad (4)$$

Таким чином, рівняннями (2) та (4) визначено енергоспоживання БВ на етапі вимірювання ІФХ.

Оцінка енергоспоживання БВ на етапі передавання даних. Для визначення енергоспоживання на етапі передавання даних використано вираз для розрахунку енергії на передавання одного пакета:

$$E_{tx} = I_{tx} \cdot U \cdot t_{packet}, \quad (5)$$

де I_{tx} – струм передавача, мА, значення струму залежить від типу мікроконтролера; U – напруга живлення, В, значення, залежить від типу мікроконтролера, і наводиться в специфікації; t_{packet} – тривалість передавання одного пакета, с. Тривалість передавання одного пакета розраховується за формулою: $t_{packet} = k/R$, де k – розмір пакета, біт, відповідно до конструкторської документації мережі, R – швидкість передавання даних, біт/с. Для протоколу ZigBee стандартним значенням є $R = 250$ кбіт/с.

В цій роботі прийнято, що БВ реалізовано на базі системи на кристалі (System-on-Chip), у якій мікроконтролер і трансивер інтегровані в єдиний модуль. Тому під I_{tx} розуміється сумарне споживання модуля у режимі передавання.

Зазначена спрощена модель (5) дає базову оцінку енергоспоживання без урахування змінних умов експлуатації, таких, як вплив навколишнього середовища або варіації параметрів живлення.

Визначення параметрів загальної моделі енергоспоживання БСМ. Параметри моделі зумовлені прикладною задачею, робочим циклом БВ, масштабом мережі, тривалістю вегетаційного періоду та середовищем розгортання мережі. Для побудови моделі визначено такі параметри:

E_{total} – загальне енергоспоживання бездротової мережі за вегетаційний період; e – енергоспоживання одного бездротового вузла; p – кількість бездротових вузлів; q – кількість днів вегетаційного періоду; s – кількість вимірювань за день; N – етапи робочого циклу бездротових вузлів, $N = \{w, i, s, as,$

m, tx, sl): w – вихід зі сну, i – ініціалізація, s – вибір каналу, as – оцінка чистоти каналу, m – вимірювання даних, tx – передавання, sl – режим сну; t_N – тривалість відповідного етапу для $N=\{w, i, s, as, m, tx, sl\}$.

Як було зазначено вище, повний робочий цикл БВ складається із семи етапів. Визначимо їх, як параметри моделі, що впливають на загальне енергоспоживання БВ:

E_w – енергоспоживання на етапі виходу зі сну; E_i – енергоспоживання на етапі ініціалізації; E_s – енергоспоживання на етапі вибору каналу; E_{as} – енергоспоживання на етапі оцінки чистоти каналу; E_{meas} – енергоспоживання на етапі вимірювання даних; E_{tx} – енергоспоживання на етапі передавання даних; E_{sl} – енергоспоживання на етапі режиму сну.

Формалізація процесу енергоспоживання. Пропонується формалізувати загальне енергоспоживання БВ мережі, як у скалярному виді, так і в матричній формі. Матрична форма дає змогу об'єднати дані про енергоспоживання окремих вузлів у єдиній структурі, оцінити внесок кожного вузла у загальне енергоспоживання мережі.

Енергоспоживання сукупності БВ мережі за вегетаційний період, подамо у вигляді матриці E_{node} , розмірності $p \times q$:

$$E_{node} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1q} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{p1} & e_{p2} & \dots & e_{pq} \end{bmatrix},$$

де p – кількість БВ ($i = 1, 2, \dots, p$); q – кількість днів вегетаційного періоду, ($j = 1, 2, \dots, q$); e_{ij} – енергоспоживання i -го вузла в j -й день за один робочий цикл.

Параметр s – подамо у вигляді вектора-рядка розмірності $1 \times q$, що містить кількість вимірювань у кожний день вегетаційного періоду: $S_j = [s_1, s_2, \dots, s_q]$, де s_j – кількість вимірювань у j -й день вегетаційного періоду, $S_j = 1, 2, \dots, q$.

Тоді, загальне енергоспоживання за повний вегетаційний період E_{total} визначимо на основі взаємодії матриці E_{node} та вектора-рядка S_j . Математично цей зв'язок подається як сума добутків e_{ij} на S_j .

У скалярному вигляді рівняння для визначення E_{total} має вигляд:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q e_{ij} \cdot s_j. \quad (6)$$

З іншого боку, загальне енергоспоживання БВ визначається його робочим циклом, що складається з N етапів. Тоді енергоспоживання БВ визначимо виразом:

$$e_{ij} = \sum_{n=1}^7 e_N. \quad (7)$$

Після підстановки (7) у формулу (6), отримаємо рівняння для визначення загального енергоспоживання мережі за вегетаційний період E_{total} :

$$E_{total} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \left(\sum_{N=1}^7 e_{N,ij} \cdot s_j \right), \quad (8)$$

де $e_{N,ij}$ – енергоспоживання БВ за робочий цикл; s_j – кількість вимірювань за день.

Значимо, що такі етапи робочого циклу, як вимірювання та передавання даних відбуваються не щодня. Для коректного відображення в моделі введено бінарний індикатор наявності вимірювань δ_j , який визначається за такими умовами:

якщо в j -й день кількість вимірювань $s_j > 0$, то $\delta_j = 1$;

якщо в j -й день кількість вимірювань $s_j = 0$, то $\delta_j = 0$.

З урахуванням індикатора δ_j , вираз для визначення загального енергоспоживання мережі набуває вигляду:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \left[\left(\delta_j \cdot s_j \right) \cdot \left(\sum_{N=1}^7 e_{N,ij} \right) + \left(1 - \delta_j \right) \cdot \left(\sum_{N=1}^5 e_{N,ij} \right) \right], \quad (9)$$

де p – кількість вузлів мережі; q – кількість днів вегетаційного періоду; s_j – кількість вимірювань у j -й день; $\delta_j \in [0,1]$ – бінарний індикатор наявності вимірювань у j -й день; $e_{N,ij}$ – спожита вузлом енергія на N -му етапі у j -й день; $N = 1..7$ – етапи повного робочого циклу; $N = 1..5$ – етапи неповного робочого циклу.

Для формалізації рівняння (9) в матричному вигляді введено додаткові параметри:

δ_j та s_j – вектори-рядки розмірності $1 \times q$, які розгортаються уздовж p вузлів за допомогою добутку Кронекера до матриць розмірності $p \times q$, що дає змогу виконати поелементне множення; $D = \delta_j \circ s_j$ – матриця, розмірності $p \times q$, яка отримана в результаті поелементного множення δ_j та s_j ; символ \circ – позначає оператор і виконує операцію поелементного множення (добуток Адамара); $(1 - \delta_j)$ – вектор-рядок розмірності $1 \times q$, аналогічно розгортається до матриці розмірності $p \times q$, що дає змогу виконувати поелементне множення з матрицею E_{N5} ;

E_{N7} – матриця сумарного енергоспоживання за повний робочий цикл, що складається із семи етапів:

$$E_{N7} = \sum_{N=1}^7 e_{N,ij};$$

E_{N5} – матриця сумарного енергоспоживання за неповний робочий цикл, що складається з п'яти етапів:

$$E_{N5} = \sum_{N=1}^5 e_{N,ij}.$$

Для обчислення повної суми енергоспоживання використано вектори одиниць:

- $1_{p \times 1}^T$ – транспонований вектор-стовпець одиниць розмірності $1 \times p$, який забезпечує підсумовування за вузлами (рядками);

- $1_{q \times 1}^T$ – вектор-стовпець одиниць розмірності $1 \times q$, призначений для підсумовування за днями (стовпцями).

Тоді, після введення зазначених параметрів у (9), модель енергоспоживання мережі у компактній матричній формі набуває вигляду:

$$E_{total} = 1_{p \times 1}^T \cdot \left[(D \circ E_{N7}) + (1 - \delta_j) \circ E_{N5} \right] \cdot 1_{q \times 1}. \quad (10)$$

Наступним кроком деталізуємо рівняння (7) для повного робочого циклу:

$$E_N = E_w + E_i + E_s + E_{as} + E_{meas} + E_{tx} + E_{sl}. \quad (11)$$

Після підстановки рівняння (11) у формулу (9), отримаємо вираз:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \left((E_w + E_i + E_s + E_{as} + E_m + E_{ts} + E_{sl}) \cdot (\delta_j \cdot s_j) \right) + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \left((E_w + E_i + E_s + E_{as} + E_{sl}) \cdot (1 - \delta_j) \right). \quad (12)$$

Далі, відповідно до рівняння (2), з урахуванням сталості складових на кожному етапі, енергію кожного етапу визначимо таким чином:

$$E_N = I_N \cdot U_N \cdot t_N. \quad (13)$$

Узагальнивши рівняння (12), з урахуванням рівнянь (4), (5) та (13) отримаємо проміжну модель:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \left[(\delta_j \cdot s_j) \left(\sum_{N=1}^7 I_{N,ij} \cdot U_{N,ij} \cdot t_{N,ij} \right) + (1 - \delta_j) \cdot \left(\sum_{N=1}^5 I_{N,ij} \cdot U_{N,ij} \cdot t_{N,ij} \right) \right]. \quad (14)$$

Тоді, враховуючи у (14) складові кожного етапу робочого циклу БВ, отримаємо підсумкову модель енергоспоживання мережі у скалярному вигляді:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \left[(\delta_j \cdot s_j) \left((I_w \cdot U_w \cdot t_w) + (I_i \cdot U_i \cdot t_i) + (I_s \cdot U_s \cdot t_s) + (I_{as} \cdot U_{as} \cdot t_{as}) + (I_{total} \cdot U_{meas} \cdot \Delta t \cdot n) + \left(I_{tx} \cdot U \cdot \frac{k}{R} \right) + (I_{sl} \cdot U_{sl} \cdot t_{sl}) \right) + \left[(1 - \delta_j) \left((I_w \cdot U_w \cdot t_w) + (I_i \cdot U_i \cdot t_i) + (I_s \cdot U_s \cdot t_s) + (I_{as} \cdot U_{as} \cdot t_{as}) + (I_{sl} \cdot U_{sl} \cdot t_{sl}) \right) \right], \quad (15)$$

де p – кількість бездротових вузлів; q – дні вегетаційного періоду; s_j – кількість вимірювань за день; I_N – струм на певному етапі; U_N – напруга на певному етапі; t_N – тривалість певного етапу; δ_j – бінарний індикатор вимірювань.

На основі скалярного рівняння процесу енергоспоживання мережі за вегетаційний період (15) формалізуємо модель у матричній формі за таким алгоритмом.

1. Визначення E_{const} – постійної складової енергоспоживання для неповного робочого циклу (за $N = 5$ етапів), які виконуються щоденно упродовж вегетаційного періоду, незалежно від проведення вимірювання і передавання даних, визначимо як:

$$E_{const} = (I_w \cdot U_w \cdot t_w) + (I_i \cdot U_i \cdot t_i) + (I_s \cdot U_s \cdot t_s) + (I_{as} \cdot U_{as} \cdot t_{as}) + (I_{sl} \cdot U_{sl} \cdot t_{sl}),$$

де E_{const} – скалярна величина, спільна для всіх вузлів p та днів вегетаційного періоду q .

2. Визначення E_{active} – змінної складової, повного робочого циклу, тобто енергоспоживання мережі за наявності етапів вимірювання і передавання даних. Визначимо E_{active} рівнянням:

$$E_{active} = (I_{total} \cdot U_{meas} \cdot \Delta t \cdot n) + \left(I_{tx} \cdot U \cdot \frac{k}{R} \right) + \\ + (I_w \cdot U_w \cdot t_w) + (I_i \cdot U_i \cdot t_i) + (I_s \cdot U_s \cdot t_s) + (I_{as} \cdot U_{as} \cdot t_{as}) + (I_{sl} \cdot U_{sl} \cdot t_{sl}),$$

де E_{active} – скалярна величина, що застосовується лише в дні проведення вимірювань і передавання даних та застосовується до всіх вузлів p .

Після підстановки складових E_{const} та E_{active} у рівняння (10), отримано остаточне матричне рівняння, яке описує загальне енергоспоживання БСМ і має вигляд:

$$E_{total} = 1_{p \times 1}^T \cdot [D \circ E_{active} + 1_{p \times q} \circ E_{const}] \cdot 1_{q \times 1}. \quad (16)$$

Отже, рівняння (16) є багатофакторною математичною моделлю енергоспоживання БСМ за вегетаційний період, яка формалізована у матричній формі. На основі моделі, описаної рівняннями (15), (16) розроблено програмний застосунок "Аналізатор енергоспоживання" призначений для прогнозування енергоспоживання БСМ [13].

Модель потужності передавача з урахуванням ослаблення сигналу у рослинному середовищі. З метою підвищення точності моделювання енергоспоживання БВ на етапі передавання даних в умовах рослинного середовища запропоновано модель адаптивної потужності передавача, яка дає змогу врахувати вплив перешкод, зумовлених типом середовища, та підвищити енергоефективність мережі, шляхом динамічного регулювання потужності передавання.

У рівнянні (5) представлено базову модель, у якій потужність передавача визначається як функція часу передавання пакета. Однак, ця модель не враховує зовнішніх факторів, що впливають на поширення сигналу. Тому в роботі запропоновано модель адаптивної потужності передавача, яка дозволяє врахувати ослаблення сигналу в рослинному середовищі за допомогою спеціального коефіцієнта.

На етапі передавання даних енергоспоживання визначається як інтеграл миттєвої потужності передавача за часом:

$$E_{tx,el} = \int_0^T P_{tx,el}(t) dt,$$

де $P_{tx,el}(t)$ – миттєва електрична потужність споживання передавача у момент часу t , Вт; T – тривалість передавання даних, с.

Миттєву електричну потужність передавача можна подати у класичному вигляді як добуток миттєвих значень струму та напруги:

$$P_{tx,el}(t) = I_{tx}(t) \cdot U(t), \quad (17)$$

де $I_{tx}(t)$ – миттєвий струм споживання передавача, А; $U(t)$ – напруга живлення передавача, В.

На основі (17) визначено базову електричну потужність, яка споживається передавачем під час передавання даних. Це значення обчислюється за технічними характеристиками апаратної платформи та визначає максимальний рівень навантаження на автономне джерело живлення:

$$P_{tx,el} = I_{tx} \cdot U, \quad (18)$$

де $P_{tx,el}$ – базова електрична потужність, яка споживається передавачем, Вт.

З метою урахування впливу рослинного середовища та частотних властивостей радіоканалу на енергоспоживання БВ, необхідно перейти від електричної потужності до потужності радіовипромінювання шляхом введення до рівняння (18) коефіцієнта корисної дії (ККД) передавального тракта. Таким чином, потужність радіовипромінювання визначається рівнянням:

$$P_{tx} = \eta \cdot P_{tx,el}, \quad (18')$$

де P_{tx} – випромінювана (вихідна) потужність передавача, Вт; η – коефіцієнт корисної дії передавального тракта, який визначається як відношення вихідної потужності $P_{tx,r}$ до базової електричної потужності споживаної передавачем $P_{tx,el}$: $\eta = P_{tx}/P_{tx,el}$. Використання ККД передавального тракта дає змогу розмежувати апаратні (електричні) характеристики БВ та вплив рослинного середовища.

Модель адаптивної потужності передавача. Для повної оцінки енергоспоживання БВ необхідно врахувати вплив середовища на якість зв'язку, а отже – на необхідний рівень випромінюваної потужності передавача. Залежність між умовами поширення сигналу та енергоспоживанням моделюється шляхом компенсації ослаблення сигналу, зумовленого впливом середовища поширення, що безпосередньо впливає на значення потужності, необхідну для забезпечення заданої якості зв'язку. З цією метою запропоновано модель адаптивної потужності передавача, у якій рівень випромінюваної потужності змінюється залежно від умов поширення сигналу в середовищі.

Основне рівняння моделі має вигляд:

$$P_{adapt} = P_{tx} \cdot k_{env}, \quad (19)$$

де P_{adapt} – адаптивна вихідна потужність передавача, яка повинна задовольняти умову $P_{adapt} \geq P_{tx}$, P_{tx} – базовий рівень випромінюваної потужності передавача, Вт; k_{env} – коефіцієнт впливу середовища (лінійна величина).

Адаптивна потужність передавача є динамічним параметром, величина якого корегується відповідно до поточних умов поширення сигналу та узгоджується з надійністю передавання даних.

Коефіцієнт впливу середовища. Для формалізації впливу середовища в моделі вводиться коефіцієнт k_{env} , який враховує загальне ослаблення сигналу. Це лінійна безрозмірна величина, що відображає сукупний вплив параметрів середовища на поширення радіосигналу та використовується в моделі (19) для динамічного коригування потужності передавача. Функціональну залежність запишемо у вигляді:

$$k_{env} = k(f, d, d_{foliage}), \quad (20)$$

де f – частота, ГГц; d – відстань між передавачем і приймачем, м; $d_{foliage}$ – глибина шару рослинності, крізь який проходить сигнал, м.

Загальне ослаблення сигналу визначається як сума втрат у вільному просторі та додаткових втрат, зумовлених впливом середовища:

$$L_{total} = L_{fs} + L_{env}, \quad (21)$$

де L_{total} – загальне ослаблення сигналу, дБ; L_{fs} – ослаблення сигналу у вільному просторі, дБ; L_{env} – додаткове ослаблення сигналу, зумовлене певним середовищем, дБ.

Інтеграцію коефіцієнта k_{env} у рівняння (19) здійснено у лінійній шкалі, тому виконано його перетворення з логарифмічної шкали:

$$k_{env} = 10^{\left(\frac{L_{total}}{10}\right)}. \quad (22)$$

Визначення ослаблення сигналу у вільному просторі. Спеціалізація моделі Фріса. Ослаблення сигналу у вільному просторі є базовим орієнтиром для аналізу впливу середовища на поширення радіохвиль. За відсутності перешкод (рослинності, будівель, атмосферних умов тощо) сигнал затухає виключно внаслідок геометричного розширення фронту хвилі. Це явище описується класичною формулою Фріса [14]:

$$P_r = A \cdot \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi d)^2}, \quad (22')$$

де P_r – потужність антени приймача, Вт; P_t – потужність антени передавача, Вт; G_t – коефіцієнт підсилення антени передавача, безрозмірна величина; G_r – коефіцієнт підсилення антени приймача, безрозмірна величина; λ – довжина хвилі сигналу, м; d – відстань між антенами, м; A – константа, яка в ідеальних умовах дорівнює 1, в інших умовах значення константи треба розраховувати.

У практичних розрахунках для визначення втрат у децибелах зручно використовувати логарифмічну форму, рівняння [15, с. 107–108]:

$$L = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right). \quad (23)$$

Використовуючи властивість інверсії аргументу логарифма, отримаємо:

$$L = 10 \cdot \log_{10} \left(\left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \right),$$

де d – відстань між приймачем і передавачем, м; λ – довжина хвилі, яка визначається як $\lambda = \frac{c}{f}$, де f – несуча частота, Гц; c – швидкість світла у вакуумі, $c = 3 \times 10^8$ м/с.

Підставивши замість довжини хвилі λ частоту f , отримаємо:

$$L_{fs} = 10 \cdot \log_{10} \left(\left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d f}{c} \right).$$

Відповідно до рекомендації ITU-R P.525 [16] для визначення ослаблення сигналу у вільному просторі, доцільно використовувати формулу:

$$L_{fs} = A + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}(d), \quad (24)$$

де L_{fs} – ослаблення сигналу у вільному просторі, дБ; d – відстань між передавачем і приймачем; A – константа, що залежить від одиниць вимірювання частоти f і відстані d .

Спеціалізація моделі Фріса (22') здійснюється шляхом її аналітичного представлення у логарифмічній формі (24), згідно [15]. Це дозволяє визначити специфічну константу A для фіксованої частоти $f = 2,4$ ГГц та еталонної відстані $d = 1$ м:

$$A = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d f}{c} \right). \quad (25)$$

Після підстановки значень частоти $f = 2,4$ ГГц та швидкості світла $c = 3 \times 10^8$ м/с отримано значення A :

$$A = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi \cdot 1 \cdot 2,4 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8} \right) = 20 \cdot \log_{10}(100,53) = 40,04 \text{ дБ.}$$

Таким чином, рівняння (24) спрощується до вигляду, де змінною є лише відстань d :

$$L_{fs} = 40,04 + 20 \cdot \log_{10}(d), \quad (26)$$

де $20 \cdot \log_{10}$ – складова, що відображає залежність втрат сигналу від відстані d у логарифмічному масштабі.

Таким чином, спеціалізована модель ослаблення сигналу у вільному просторі (26) спрощена шляхом фіксації частоти як константи $f = 2,4$ ГГц. Це дозволило перетворити загальну логарифмічну модель на прикладну формулу, у якій єдиною змінною є відстань d . Такий підхід усуває необхідність повторного перерахунку параметрів, залежних від частоти, та спрощує подальший аналіз впливу середовища на поширення радіосигналу.

Ослаблення сигналу в залежності від типу аграрного середовища. Для моделювання втрат сигналу у рослинному середовищі типу "фруктовий сад", у роботі запропоновано використати модель Вейсбергера (Weissberger's Modified Exponential Decay Model, MED) [17]. Її застосування є доцільним завдяки адаптації до середовищ із листяною рослинністю, а також відповідності частотному діапазону 2,4 ГГц, у якому функціонують типові БСМ, зокрема на базі технологій ZigBee, Wi-Fi та Bluetooth. Додатково, у роботі [16] зазначено, що модифікована експоненціальна модель затухання Вейсбергера створена на основі польових вимірювань у зонах помірного клімату, що відповідає географічним умовам більшості аграрних регіонів Центральної та Східної Європи, включно з територією України. Модель Вейсбергера охоплює частотний діапазон 230 МГц – 95 ГГц та дозволяє оцінювати ослаблення сигналу на основі двох ключових змінних: довжини шляху проходження сигналу крізь листяний покрив і робочої частоти. Емпіричні коефіцієнти моделі отримані на основі великої кількості польових вимірювань та забезпечують достатню точність для оцінювання втрат сигналу у рослинному середовищі.

Слід зазначити, що модель Вейсбергера не враховує різницю у висоті антен передавача та приймача, а отже, передбачає їх розміщення на однаковому або близькому рівні в межах рослинного покриву. Це відповідає типовим умовам розгортання БВ у фруктових садах, де антени зазвичай встановлюються на висоті 1,5–3 м над поверхнею ґрунту. Крім того, модель Вейсбергера має зручне аналітичне представлення, що дозволяє інтегрувати її в загальну модель енергоспоживання через коефіцієнт впливу середовища k_{env} та реалізувати адаптивне регулювання потужності передавача.

Математичне представлення моделі. Сумарні втрати під час проходження сигналу через зону листяних насаджень визначаються як сума втрат:

$$L_{total} = L_{fs} + L_{Foilage}.$$

де L_{fs} – втрати сигналу у вільному просторі, дБ; $L_{Foilage}$ – втрати сигналу у листяному покриві дерев, дБ.

Ослаблення $L_{Foilage}$ обчислюється за формулою:

$$L_{Foilage} = \begin{cases} 0,45 f^{0,284} d, & \text{для } 0 < d \leq 14 \\ 1,33 f^{0,284} d^{0,588}, & \text{для } 14 < d \leq 400 \end{cases}, \quad (27)$$

де f – несуча частота, ГГц; d – довжина шляху крізь листяний покрив, м; $C' = \alpha = 0,588$ – диференціальний коефіцієнт загасання в рослинному середовищі, дБ/м, емпіричний; 1,33 та 0,45 – емпіричні коефіцієнти, що характеризують інтенсивність поглинання радіохвиль листяною рослинністю залежно від довжини шляху сигналу в рослинному середовищі.

Модель ослаблення сигналу на базі моделі Вейсбергера. З урахуванням спеціалізованої моделі (26) та моделі Вейсбергера (27), запропоновано модель ослаблення сигналу для рослинного середовища типу "фруктовий сад" у вигляді:

$$L_{total} = 40,04 + 20 \cdot \log_{10}(d) + L_{Foilage}.$$

Оскільки для типового фруктового саду глибина листяного покриву, як правило, перевищує 14 м, при формуванні вихідної моделі ослаблення сигналу відповідно до рекомендацій [17], застосовано другий випадок залежності (27). Тоді, модель ослаблення сигналу для рослинного середовища типу "фруктовий сад", набуває вигляду:

$$L_{garden} = 40,04 + 20 \cdot \log_{10}(d) + 1,33 \cdot (f)^{0,284} \cdot (d_{Foilage})^{0,588}.$$

Для спеціалізації моделі L_{garden} до умов функціонування мережі на частоті 2,4 ГГц, визначимо частотний коефіцієнт $B' = 1,33 \cdot (f)^{0,284} = 1,33 \cdot (2,4)^{0,284} = 1,7$, де f – частота у ГГц, отримаємо проміжний вид модифікованої моделі ослаблення сигналу:

$$L_{garden} = 40,04 + 20 \cdot \log_{10}(d) + 1,7 \cdot (d_{Foilage})^{0,588}, \quad (28)$$

де $A = 40,04$ дБ – константа для частоти 2,4 ГГц; d – відстань між передавачем і приймачем, м; $d_{Foilage}$ – довжина шляху сигналу крізь рослинність, м.

Отже, рівняння (28) представляє модель ослаблення сигналу у рослинному середовищі типу "фруктовий сад", яка є результатом спеціалізації формули Фріса та моделі Вейсбергера. Модель враховує вплив листяного покриву на загальні втрати радіосигналу та використовується як вихідна залежність для подальшої валідації, калібрування експоненціального коефіцієнта C' та побудови моделі адаптивної потужності передавача.

Адаптивна потужність передавача. Для визначення адаптивної потужності передавача інтегруємо рівняння (28) у рівняння (19) і таким чином, отримаємо рівняння:

$$P_{adapt} = P_{tx} \cdot k_{env} = P_{tx} \cdot 10^{L_{garden}/10}, \quad (29)$$

де P_{adapt} – адаптивна вихідна потужність передавача, необхідна для компенсації ослаблення сигналу в радіоканалі та забезпечення надійного зв'язку, Вт; k_{env} – коефіцієнт впливу середовища; L_{garden} – ослаблення сигналу в рослинному середовищі типу "фруктовий сад"; P_{tx} – базова вихідна потужність передавача, Вт.

Запропонований підхід, формалізований у моделі адаптивної потужності (29), дозволяє безпосередньо інтегрувати вплив рослинного середовища на енергоспоживання БВ у математичну модель. Водночас модель адаптивної потужності потребує подальшого розвитку на основі фундаментальних принципів, зокрема – узгодження з балансом потужностей у каналі зв'язку.

Динамічне регулювання потужності передавача на основі балансу потужностей. Відповідно до базового рівняння балансу потужностей [15, с. 69–104], чутливість приймача визначається виразом, що описує співвідношення між потужністю передавача, коефіцієнтами підсилення антен та загальними втратами сигналу в середовищі:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{total}, \quad (30)$$

де P_{rx} – потужність сигналу на вході приймача (чутливість), дБ; P_{tx} – потужність передавача, дБ; G_{tx}, G_{rx} – коефіцієнти підсилення антен передавача та приймача відповідно, безрозмірна величина; L_{total} – загальні втрати сигналу в середовищі, дБ.

Умовою якісного приймання даних у БСМ є мінімально необхідна потужність сигналу на вході приймача:

$$P_{rx} \geq P_{rx,target}, \quad (31)$$

де $P_{rx,target}$ – порогове значення потужності прийому, достатнє для декодування пакета без помилок. Оскільки потужність P_{rx} зумовлена параметрами каналу зв'язку, яка залежить від вихідної потужності передавача P_{tx} , характеристик антен і втрат згідно з рівнянням (30). Тоді мінімально необхідна потужність передавача для забезпечення надійного зв'язку становить:

$$P_{tx,min} \geq P_{rx,target} - G_{tx} - G_{rx} + L_{total}. \quad (32)$$

У межах цієї роботи модель адаптивної потужності передавача (19) розглядається як формальний механізм масштабування потужності випромінювання до величини $P_{tx,min} \equiv P_{adapt}$, необхідний для надійного зв'язку в рослинному середовищі. Саме параметр $P_{tx,min}$ узгоджується з рівнянням балансу потужностей (32). Такий підхід дозволяє встановити фізично обґрунтовані межі адаптації потужності передавача, запобігти втраті зв'язку та врахувати апаратні параметри системи. Оскільки рівняння балансу потужностей (32) вимагає точного визначення L_{total} , то постає необхідність її валідації.

Емпіричне дослідження та моделювання ймовірності успішного передавання P (QoS). Валідація моделі L_{garden} . На основі проведеного тестування БСМ у [18], у роботі [19] на базі експериментальних даних [20] було побудовано та досліджено логістичну модель на основі предиктора "Відстань".

У рамках цієї роботи, на основі даних [20], побудовано логістичну регресійну модель із предиктором L_{garden} – сумарним ослабленням сигналу, яке враховує вплив відстані, несучої частоти та рослинного середовища. Загальну вибірку, що містить 91 спостереження, було розподілено на: тренувальну ($n = 50$) – для побудови та навчання моделі; тестову ($n = 41$) – для перевірки її класифікаційної здатності. Розрахунок коефіцієнтів моделі та статистичних показників здійснено в програмному середовищі R. Отримані результати наведено в табл. 1.

ТАБЛИЦЯ 1. Коефіцієнти логістичної регресійної моделі та статистичні показники

Коефіцієнт	Оцінка	Стандартна помилка	z статистика	p-значення
β_0	21,4851	10,2954	2,087	0,0369
β_1	-0,2468	0,1244	-1,984	0,0472

Отже, емпірична логістична модель з предиктором L_{garden} має вигляд:

$$\ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = 21,4857 - 0,2468 \cdot L_{garden}, \quad (33)$$

де $L_{garden} = 40,04 + 20 \cdot \log_{10}(d) + 1,7 \cdot (d_{foilage})^{(0.588)}$ – сумарне ослаблення сигналу в рослинному середовищі типу "фруктовий сад", за рівнянням (28), де 1,7 – коефіцієнт для фіксованої частоти $f = 2,4$ ГГц.

Представимо рівняння (33) у вигляді функції ймовірності:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(21,4857 - 0,2468 \cdot L_{garden})}}.$$

Оцінювання емпіричної моделі. На підставі значень z-статистики та p-значень (табл. 1) підтверджено статистичну значущість обох коефіцієнтів. Від'ємний коефіцієнт β_1 свідчить, що зі збільшенням значення предиктора L_{garden} ймовірність успішного передавання даних зменшується, що

відповідає фізичній інтерпретації процесу ослаблення сигналу в рослинному середовищі. Для перевірки статистичної значущості предиктора L_{garden} застосовано LR-тест. У результаті отримано значення статистики: $LR = 5,37$, $p = 0,02048$. Зазначена статистика підпорядковується χ^2 розподілу з одним ступенем свободи, що відповідає кількості доданих до моделі предикторів. За рівня значущості $\alpha = 0,05$, критичне значення становить 3,841. Оскільки $LR = 5,37 > 3,841$, нульову гіпотезу відхилено, а предиктор L_{garden} визнано статистично значущим.

Проведено оцінювання за інформаційним критерієм Акаїке, який враховує як точність моделі, так і її складність: $AIC_{\text{базова модель}} = 57,108$, $AIC_{\text{повна модель}} = 53,738$, таким чином $\Delta AIC = 3,37$. Згідно з пороговим вирішальним правилом: $\Delta AIC = 3,37 > 2$, повна і базова моделі не вважаються еквівалентними. Таким чином, на підставі статистичної значущості коефіцієнтів, LR-тесту та значення ΔAIC повну модель визнано статистично обґрунтованою і придатною для прогнозування.

Оцінка моделі на тестовому наборі даних. Після навчання модель застосовано для класифікації на тестовому наборі даних. Класифікацію виконано за пороговим вирішальним правилом з порогом $t = 0,6$:

якщо ймовірність $\geq 0,6$, об'єкт відноситься до класу 1, інакше – до класу 0.

Результати класифікації наведено у вигляді матриці невідповідностей (табл. 2).

ТАБЛИЦЯ 2. Матриця невідповідностей

	Прогнозований клас = 0	Прогнозований клас = 1
Фактичний клас 0	3 (True Negative)	1 (False Positive)
Фактичний клас 1	2 (False Negative)	35 (True Positive)

На основі матриці невідповідностей розраховано такі показники якості моделі: **Accuracy** = 0,927, **Precision** = 0,946, **Recall** = 0,972, **Specificity** = 0,6, **F1 Score** = 0,959, **AUC** = 0,747.

Оцінка ефективності логістичної моделі. Отримані результати свідчать про високу класифікаційну здатність логістичної регресії. Значення метрики Accuracy підтверджує ефективність моделі. Високі значення Recall та Precision свідчать про здатність моделі виявляти позитивні випадки з мінімальною кількістю хибнопозитивних результатів. Значення F1 Score демонструє узгодженість між чутливістю та точністю. Specificity (0,6) вказує на обмежену здатність моделі до класифікації негативного класу, що пояснюється пріоритетністю виявлення позитивних випадків. $AUC = 0,747$ свідчить про добру здатність моделі розрізняти класи. Отже, модель є надійною для виявлення позитивних результатів. Таким чином, на основі даних натурального експерименту виконано валідацію моделі L_{garden} , визначеної рівнянням (28). Побудова емпіричної моделі з предиктором L_{garden} дозволила врахувати не лише відстань, а й несучу частоту та вплив рослинного середовища на поширення радіосигналу. Висока точність моделі 92,7 % та статистична значущість предиктора L_{garden} підтверджують адекватність моделі (28). Отже, процедуру валідації моделі можна вважати успішною.

Порівняльний аналіз емпіричних моделей та вибір остаточної моделі. З метою подальшого використання емпіричної моделі у рівняннях енергетичного балансу, необхідно обрати модель, статистично обґрунтовану та фізично інтерпретовану. Для забезпечення об'єктивності порівняння: Модель 1 (з предиктором "Відстань"), Модель 2 (з предиктором L_{garden}) побудовано на ідентичній вибірці спостережень ($n = 50$). Порівняльний аналіз виконано на основі показників (табл. 3).

Розглянемо порівняльні показники моделей. Значення LR-статистики для Моделі 1 ($LR = 6,53$) та Моделі 2 ($LR = 5,37$; $p = 0,02048$) підтверджують статистичну значущість предикторів та покращу-

щення моделей порівняно з базовою, що вказує на їх відповідність у межах проведеного експерименту. Різниця значень інформаційного критерію Акаїке $\Delta AIC = 1,164$ між моделями не перевищує порогового значення 2, тому моделі вважаються статистично еквівалентними та мають вагому підтримку даними.

ТАБЛИЦЯ 3. Статистичні та класифікаційні показники

н/п	AIC базова модель	AIC повна модель	LR-статистика	Accuracy	Precision	Sensitivity (Recall)	Specificity	F1 Score	AUC
Модель 1	57,108	52,574	6,53	0,927	0,946	0,972	0,6	0,959	0,747
Модель 2	57,108	53,738	5,37	0,927	0,946	0,972	0,6	0,959	0,747

Порівняння за метриками класифікації показало, що обидві моделі мають однакові значення показників, що зумовлено структурною подібністю моделей у межах використаної вибірки. Водночас тождність значень метрик не свідчить про повну рівноцінність моделей, а лише відображає подібність результатів у конкретних умовах експерименту.

Таким чином, обидві моделі є статистично обґрунтованими та еквівалентними за інформаційним критерієм Акаїке і метриками класифікації. Водночас модель 2 має перевагу для подальшої інтеграції у модель енергетичного балансу, оскільки вона побудована на емпіричних параметрах, що фізично інтерпретовані у процесах поширення радіосигналу. З огляду на статистичну значущість предиктора L_{garden} , відповідність моделі експериментальним даним та фізичну інтерпретацію її параметрів, модель 2 за рівнянням (28) вважається статистично валідованою та придатною для калібрування.

Калібрування моделі L_{garden} . З метою визначення остаточного вигляду моделі ослаблення сигналу в рослинному середовищі типу "фруктовий сад" виконано калібрування моделі (28). Числові коефіцієнти у моделі ослаблення сигналу замінено параметричними змінними, що підлягають оцінюванню. У такому разі загальний вигляд моделі набуває такого вигляду: $L_{garden} = A' + N' \cdot \log_{10}(d) + B' \cdot (d_{Foliage})^{C'}$.

Спроба одночасного калібрування всіх параметрів моделі призвела до нефізичних результатів через їх високу кореляцію, яка обумовлена умовою експерименту $d = d_{Foliage}$. Тому параметри A' , N' та B' зафіксовано на теоретично обґрунтованих значеннях, тоді як калібруванню підлягав лише параметр C' , який характеризує ступінь затухання сигналу залежно від глибини листяного покриву в умовах рослинного середовища "фруктовий сад".

Калібрування параметра C' виконано шляхом мінімізації функції втрат *Logarithmic Loss*, сформуваної на основі логістичної регресії (35), яка описує залежність ймовірності прийому сигналу від відстані та глибини листяного покриву. Мінімізацію виконано методом нелінійної оптимізації L-BFGS-B [21] з обмеженням $C' \geq 0$, що забезпечує фізичну коректність параметра.

У результаті калібрування отримано уточнене значення експоненти глибини листяного покриву $C' = 0,5956$, що на 1,3 % перевищує значення параметру в моделі Вейсберґера ($C' = 0,5880$). Мінімальне значення функції втрат ($Log Loss = 39,3686$) свідчить про достатню точність та адекватність моделі для опису ослаблення сигналу в умовах рослинного середовища типу "фруктовий сад". Після уточнення параметра C' модель (28) для рослинного середовища типу "фруктовий сад" набуває вигляду:

$$L_{garden} = 40,04 + 20,00 \cdot \log_{10}(d) + 1,7 \cdot (d_{Foliage})^{0,5956}. \quad (33')$$

Таким чином, шляхом калібрування моделі отримано адаптовану емпіричну модель (33'), яка є фізично обґрунтованою та може бути використана для опису ослаблення сигналу у рослинному середовищі типу "фруктовий сад", а також застосована у рівняннях енергетичного балансу БСМ.

Синтез теоретичної та емпіричної моделей для адаптивного керування якістю зв'язку. Результат синтезу – це побудова моделі, яка дає змогу розрахувати ключовий параметр – адаптивну потужність передавача P_{adapt} згідно з (19). Цей параметр забезпечує заданий рівень якості обслуговування (QoS), що інтерпретується через імовірність успішного передавання даних.

Валідована емпірична модель (33), яка описує статистичну залежність між QoS та ослабленням сигналу L_{garden} , інтегрується у фундаментальну фізичну модель (29). Такий синтез є необхідним для перетворення статистичного опису каналу зв'язку на практичний керувальний інструмент – модель адаптованої потужності передавача, що відповідає вимогам балансу потужностей [15, с. 69–104] визначеним рівнянням (32). Синтезована модель пропонується як універсальний математичний інструмент, що встановлює прямий зв'язок між цільовими показниками QoS та необхідною адаптивною потужністю передавача.

Формалізація вимог до QoS. Для БСМ аграрного призначення якість обслуговування визначається надійністю доставки даних та характеризується параметрами:

- імовірність встановлення зв'язку P , яка інтерпретується як імовірність доставки пакета з прийнятною якістю сигналу;

- цільовою умовою $P \geq P_{порог}$, де $P_{порог} \in [0,8; 0,99]$.

Для критично важливих застосувань доцільно встановлювати $P_{порог} \geq 0,95$.

Отже, $P_{порог}$ – ключовий вхідний параметр синтезу моделі адаптивної потужності.

Методологічні основи синтезу моделі адаптивної потужності. Синтез моделі ґрунтується на інтеграції двох комплементарних складових:

- теоретична модель адаптивної потужності за рівнянням (29) – фізична модель, що базується на масштабуванні базової вихідної потужності для компенсації загальних втрат;

- емпірична логістична модель за рівнянням (33) – статистична модель, встановлення статистичної залежності між ослабленням сигналу у рослинному середовищі типу "фруктовий сад" L_{garden} та ймовірністю успішного передавання даних P .

Синтез моделей (29) та (33) дозволяє розв'язати обернену задачу – визначити мінімальну потужність передавача P_{adapt} , яка гарантує заданий рівень QoS у конкретному рослинному середовищі.

Алгоритм синтезу та обґрунтування керуючої моделі

1. Вираження ослаблення сигналу L_{garden} через цільову ймовірність P .

Для універсального рослинного середовища ця залежність має вигляд:

$$\ln\left(\frac{P}{1-P}\right) = \beta_0 - \beta_1 \cdot L_{total}.$$

Звідси отримуємо вираз для рівня ослаблення сигналу, який має бути компенсований з урахуванням заданого рівня якості QoS:

$$L_{garden} = \frac{\ln\left(\frac{P_{порог}}{1-P_{порог}}\right) - \beta_0}{-\beta_1},$$

де β_0, β_1 – емпіричні коефіцієнти, які визначено на основі логістичної регресії.

2. Інтеграція емпіричної залежності у фізичну модель потужності. Підстановка у модель (29) приводить до проміжного рівняння:

$$P_{adapt} = P_{tx} \cdot 10^{\frac{1}{10} \left(\frac{\ln \left(\frac{P_{порог}}{1 - P_{порог}} \right) - \beta_0}{-\beta_1} \right)}. \quad (34)$$

Однак для розв'язання оберненої задачі – визначення адаптивної потужності передавача через цільову якість зв'язку, необхідно узгодити модель (29) з рівнянням балансу потужностей (30).

Рівняння балансу потужностей дозволяє стверджувати, що $P_{adapt} \equiv P_{tx, min}$ – адаптивна вихідна потужність передавача, яка забезпечує допустимий рівень QoS. Отже, адаптивну потужність можна визначити відносно цільової чутливості приймача $P_{rx, target}$. З урахуванням того, що коефіцієнти β_0, β_1 неявно включають вплив $P_{rx, target}$, то заміна P_{tx} на $P_{rx, target}$ у формулі компенсації втрат дозволяє отримати фізично обґрунтовану керуючу модель.

3. Отримання фінальної керуючої моделі (універсальний вигляд). Для розрахунку потужності у мВт використано стандартну формулу переведення:

$$P_{rx, target} (mW) = 10^{\frac{P_{rx, target} (дБм)}{10}}.$$

Тоді фінальна універсальна модель для динамічного керування потужністю передавача набуває вигляду:

$$P_{adapt} = P_{rx, target} \cdot 10^{\frac{1}{10} \left(\frac{\ln \left(\frac{P_{порог}}{1 - P_{порог}} \right) - \beta_0}{-\beta_1} \right)}, \quad (34')$$

де P_{adapt} – керована (адаптивна) потужність передавача, мВт; $P_{rx, target}$ – цільова чутливість приймача, мВт; β_0, β_1 – коефіцієнти, які підлягають калібруванню для іншого типу рослинного середовища.

$10^{\frac{1}{10} \left(\frac{\ln \left(\frac{P_{порог}}{1 - P_{порог}} \right) - \beta_0}{-\beta_1} \right)} = k_{env}$ – коефіцієнт впливу середовища, виражений через цільову ймовірність $P_{порог}$.

У фінальній моделі адаптивної потужності (34') коефіцієнти підсилення антен G_{tx}, G_{rx} в явному вигляді не використовуються, оскільки їх вплив вже інтегрований у емпіричні коефіцієнти β_0, β_1 . Таким чином, параметри $P_{rx, target}$ та $P_{tx, min}$ інтерпретуються як ефективні ізотропні потужності, що враховують коефіцієнти підсилення антен.

Представимо фінальну керуючу модель для рослинного середовища типу "фруктовий сад":

$$P_{adapt} = P_{rx,target} \cdot 10^{\left(\frac{1}{10} \cdot \frac{\ln\left(\frac{P_{порог}}{1-P_{порог}}\right) - 24.9250}{-0.2847} \right)}$$

Узгодження з класичним рівнянням балансу потужностей. Синтезована модель (34') повністю узгоджується з класичним рівнянням балансу потужностей (30) та дозволяє розв'язати обернену задачу – визначити параметр P_{adapt} та забезпечує виконання умови (32). При цьому:

- складова $P_{rx,target}$ виступає як фізичний поріг чутливості приймача;
- експоненціальна частина моделі реалізує ефективну компенсацію загального ослаблення сигналу у рослинному середовищі L_{total} , інтегруючи вплив рослинного середовища, робочої частоти, відстані та глибини рослинного покриття на основі емпіричних даних.

Таким чином, запропонована модель, визначена рівнянням (34') реалізує керування потужністю на основі цільових вимог до QoS, що забезпечує надійність зв'язку та оптимізує енергоспоживання в реальних умовах рослинного середовища.

Енергоспоживання на етапі передавання даних на основі адаптивної потужності. Як було визначено раніше, загальні енерговитрати на передавання одного пакета даних визначаються як інтеграл миттєвої електричної потужності споживання за часом, відповідно до математичної моделі, визначеної рівнянням (17). Однак для врахування загального енергоспоживання БВ у динамічному режимі доцільно вдосконалити модель енергетичного балансу (5) шляхом введення параметра – адаптивної потужності передавача, визначеного рівнянням (34'). З цією метою на першому етапі визначається енергія радіовипромінювання, яка необхідна для успішного передавання пакета даних з урахуванням ослаблення сигналу у рослинному середовищі:

$$E_{tx} = P_{adapt} \times t_{packet} = P_{rx,target} \times 10^{\left(\frac{1}{10} \times \frac{\ln\left(\frac{P_{порог}}{1-P_{порог}}\right) - b_0}{-b_1} \right)} \times \frac{k}{R}, \quad (35)$$

де E_{tx} – енергія випромінювання на етапі передавання одного пакета даних, Дж; P_{adapt} – адаптивна потужність передавача до заданого рівня QoS; $P_{rx,target}$ – цільова чутливість приймача, мВт;

$10^{10} \cdot \frac{\ln\left(\frac{P_{порог}}{1-P_{порог}}\right) - \beta_0}{-\beta_1} = k_{env}$ – коефіцієнт впливу середовища; t_{packet} – тривалість передавання одного пакета, с. Тривалість передавання одного пакета розраховується за формулою: $t_{packet} = k/R$, де k – розмір пакета, біт, відповідно до конструкторської документації мережі, R – швидкість передавання даних, біт/с.

Таким чином, рівняння (35) формалізує енергію радіовипромінювання як функцію вимог до надійності зв'язку $P_{пороз}$, параметрів рослинного середовища β_0, β_1 , розміру пакета даних k та швидкості передавання даних в мережі R . Математична модель (35) базується на врахуванні адаптивної вихідної потужності P_{adapt} , потрібної для компенсації втрат у радіоканалі.

На другому етапі, з точки зору енергетичного балансу БВ, ключовий параметр це електрична потужність, що споживається від автономного джерела живлення. Оскільки робота БВ забезпечується через систему стабілізації напруги, у межах режиму передавання даних адаптивна потужність передавача розглядається як параметр, варіювання якого призводить до відповідної зміни струму споживання I_{κ} . Математично цей зв'язок враховано введенням параметра ККД передавального тракту у рівняння (18'), який описує ефективність перетворення електричної енергії на енергію радіовипромінювання з урахуванням втрат на генерацію, посилення та узгодження сигналу.

Оскільки енергоспоживання визначається роботою потужності протягом часу передавання пакета, для переходу від вихідної потужності передавача до показників розряду автономного джерела живлення, використовується співвідношення:

$$E_{tx,el} = \frac{E_{tx}}{\eta} = \frac{P_{adapt}}{\eta} \cdot t_{packet} = \frac{P_{adapt}}{\eta} \cdot \frac{k}{R}, \quad (35')$$

де $E_{tx,el}$ – загальне енергоспоживання бездротового вузла від автономного джерела живлення на етапі передавання одного пакета даних, Дж; η – коефіцієнт корисної дії передавального тракту.

Отримана функціональна залежність (35') дає змогу трансформувати розраховані рівні адаптивної вихідної потужності у показники енергоспоживання та оцінити інтенсивність розряду автономного джерела живлення.

Таким чином, динамічна модель енергоспоживання набуває вигляду:

$$\begin{aligned} E_{total} = & \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \left[(\delta_j \cdot s_j) \left((I_w \cdot U_w \cdot t_w) + (I_i \cdot U_i \cdot t_i) + (I_s \cdot U_s \cdot t_s) + (I_{as} \cdot U_{as} \cdot t_{as}) \right) + \right. \\ & \left. + (I_{total} \cdot U_{meas} \cdot n) + \left(\frac{P_{adapt}}{\eta} \cdot \frac{k}{R} \right) + (I_{sl} \cdot U_{sl} \cdot t_{sl}) \right] + \\ & + \left[(1 - \delta_j) \left((I_w \cdot U_w \cdot t_w) + (I_i \cdot U_i \cdot t_i) + (I_s \cdot U_s \cdot t_s) + (I_{as} \cdot U_{as} \cdot t_{as}) + (I_{sl} \cdot U_{sl} \cdot t_{sl}) \right) \right]. \quad (36) \end{aligned}$$

У розгорнутому вигляді для рослинного середовища типу "фруктовий сад" динамічна модель енергоспоживання має вигляд:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \left[(\delta_j \cdot s_j) \left((I_w \cdot U_w \cdot t_w) + (I_i \cdot U_i \cdot t_i) + (I_s \cdot U_s \cdot t_s) + (I_{as} \cdot U_{as} \cdot t_{as}) \right) + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + (I_{total} \cdot U_{meas} \cdot n) + \left(\frac{P_{rx,target} \cdot 10}{\eta} \cdot \frac{k}{R} + (I_{sl} \cdot U_{sl} \cdot t_{sl}) \right) + \\
& + \left[(1 - \delta_j) (I_w \cdot U_w \cdot t_w) + (I_i \cdot U_i \cdot t_i) + (I_s \cdot U_s \cdot t_s) + (I_{as} \cdot U_{as} \cdot t_{as}) + (I_{sl} \cdot U_{sl} \cdot t_{sl}) \right]. \quad (37)
\end{aligned}$$

Отже, у роботі побудовано математичну багатофакторну динамічну модель, представлену рівнянням (36), яка дозволяє не лише оцінити енергоспоживання БСМ протягом вегетаційного періоду, а й слугує математичним інструментом підвищення енергоефективності БСМ шляхом інтеграції механізму адаптивної вихідної потужності передавача. Динамічна модель враховує всі активні та пасивні етапи роботи вузла, ККД передавального тракту, а також адаптивне керування потужністю, що дозволяє перейти від оцінювання енерговитрат до практичного прогнозування автономності мережі.

Модель керованої потужності з урахуванням добової адаптації. Для логічного завершення розробки моделі адаптивного керування та досягнення максимальної енергоефективності доцільно об'єднати потужність P_{adapt} , що забезпечує необхідний рівень QoS, із коефіцієнтом добового регулювання $\varphi(t)$. Це дозволяє сформувати керуючу модель, яка враховує як індивідуальні характеристики радіоканалу, так і прогнозовані зміни радіосередовища протягом доби.

Математична модель керованої потужності передавача визначається як добуток адаптивної потужності P_{adapt} та коефіцієнта добового регулювання $\varphi(t)$:

$$P_{tx}(t) = P_{adapt} \cdot \varphi(t), \quad (38)$$

де $\varphi(t)$ – ваговий множник, що моделює інтенсивність використання каналу зв'язку в різні періоди доби.

$$\varphi(t) = \begin{cases} 0,8 \dots 0,9; & 00:00 \leq t \leq 05:00 \text{ (період мінімального навантаження)} \\ 1,0 \dots 1,2; & 05:01 \leq t \leq 23:59 \text{ (період змінного навантаження)}. \end{cases}$$

Зниження значення у нічний час $P_{tx}(t)$ стає можливим завдяки особливостям експлуатації БСМ в аграрному середовищі. У нічний період (00:00 – 05:00) спостерігається зниження динаміки технологічних процесів та активного моніторингу оператором. Це дозволяє реалізувати перехід БСМ до функціонування в енергозберігаючому режимі, у якому коефіцієнт $\varphi(t)$ виступає керуючим параметром, що визначає фізичне обмеження випромінюваної потужності передавача до мінімально необхідного рівня QoS.

Значення $\varphi(t)$ є рекомендованими та можуть бути скориговані емпірично в процесі дослідження або реальної експлуатації мережі залежно від фактичного навантаження на радіоканал та змін якості зв'язку.

Модель керованої потужності передавача (38), яка поєднує вимоги до надійності зв'язку та добові зміни радіоканалу, набуває вигляду:

$$P_{tx} = P_{rx,target} \cdot 10^{\left(\frac{1}{10} \cdot \frac{\ln\left(\frac{P_{порог}}{1-P_{порог}}\right) - \beta_0}{-\beta_1} \right)} \cdot \varphi(t). \quad (39)$$

Отже, інтеграція коефіцієнта $\varphi(t)$ у загальну модель адаптивного керування (39) дозволяє сформувати цілісну систему, яка враховує як динамічні характеристики каналу зв'язку, так і прогнозовані добові зміни радіосередовища.

У межах розробки комплексної концепції моделювання авторкою виконано додаткові дослідження, які не увійшли до цієї статті. Зокрема, побудовано емпіричні моделі ресурсу акумуляторів БВ – індивідуальні експоненціальні моделі деградації акумуляторів БВ. Запропоновано та обґрунтовано критерій енергетичної достатності (КЕД), який інтегрує динамічну модель енергоспоживання, емпіричну модель деградації акумулятора та агротехнологічні вимоги, що дозволяє системно прогнозувати автономність вузлів і гарантувати енергетичну надійність мережі. Розроблено метод підвищення енергоефективності БСМ.

Висновки. В результаті виконаних досліджень:

1. Розроблено комплексну концепцію моделювання енергоспоживання БСМ у рослинному середовищі, яка на відміну від існуючих підходів, інтегрує динамічні параметри радіоканалу, вимоги до надійності зв'язку, часові цикли активності мережі.

2. Запропоновано структурну модель робочого циклу бездротового вузла з поділом на повний і неповний цикли, що дало змогу коректно виокремити фонове та активне енергоспоживання і підвищити точність енергетичного моделювання.

3. Сформовано багатофакторну математичну модель енергоспоживання у скалярній і матричній формах, яка деталізовано враховує структуру робочих циклів і забезпечує прогнозування енерговитрат протягом вегетаційного періоду.

4. Запропоновано модель ослаблення радіосигналу у рослинному середовищі типу "фруктовий сад", отриману на основі комбінації спеціалізації моделі Фріса та відкаліброваної моделі Вейсберґера. Визначено коефіцієнт впливу середовища, що дозволяє враховувати фізичні параметри рослинного середовища безпосередньо у моделі енергетичного балансу БВ.

5. Виконано синтез теоретичної та емпіричної моделей, що дозволило розв'язати обернену задачу – визначити необхідну потужність передавання для заданого рівня QoS та дозволило отримати аналітичну модель адаптивного керування потужністю.

6. Розроблено динамічну модель енергоспоживання БСМ, яка встановлює взаємозв'язок між енерговитратами та якістю зв'язку, як у загальному випадку, так і для рослинного середовища типу "фруктовий сад".

7. Запропоновано модель керованої потужності із використанням коефіцієнта добової адаптації, що дозволило врахувати прогнозовані зміни радіосередовища та інтенсивність використання радіоканалу в різні періоди доби, завершивши формування концепції енергоефективності.

References

1. Chen P., O’Dea B., Callaway E. Energy efficient system design with optimum transmission range for wireless ad hoc networks. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*. 2002. P. 945–952. <https://doi.org/10.1109/ICC.2002.996995>
2. Deng J., Han Y.S., Chen, P. Varshney P.K. Optimum transmission range for wireless ad hoc networks. *In Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. 2004. P. 1024–1029. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2004.1311328>
3. Akyildiz F., Su W., Sankarasubramanian Y., Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*. 2002. Vol. 38. P. 393–422. [https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4)
4. Sinha P., Chandrakasan A.P. Dynamic power management in wireless sensor networks. *IEEE Design and Test of Computers Magazine*. 2001. Vol. 18, No 2. P. 62–74. <https://doi.org/10.1109/54.914626>
5. Ye J. H.W., Estrin D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2004. Vol. 12, No 3. P. 493–506. [https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4)
6. Niyato D., Hossain E. Sleep and wakeup strategies in solar-powered wireless sensor/mesh networks: performance analysis and optimization. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2007. Vol. 6. P. 221–236. <https://doi.org/10.1109/TMC.2007.30>
7. Ogundile O.O., Alfa A.S. A Survey on an Energy-Efficient and Energy-Balanced Routing Protocol for Wireless Sensor Networks. *Sensors*. 2017. Vol. 17, No 5. P. 1084. <https://doi.org/10.3390/s17051084>.
8. Shkil O.S., Kostyuk S.O., Filippenko I.V. Energy Saving Methods in Sensor Networks. *Radioelektronika i informatika*. 2019. 3 (86). P. 42–49. (in Ukrainian) [https://doi.org/10.30837/1563-0064.3\(86\).2019.214976](https://doi.org/10.30837/1563-0064.3(86).2019.214976)
9. Romanov V.O., Galelyuka I.B., Voronenko O.V. Wireless sensor networks for smart agriculture. *International Journal of Reasoning-based Intelligent Systems*. 2021. Vol. 13. P. 147–154. <https://doi.org/1504/IJRIS.2021.117079>
10. Khernane S., Bouam S., Arar C. Renewable Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks in Precision Agriculture. *Int. J. Netw. Distrib. Comput.* 2024. 12. P. 8–16. <https://doi.org/10.1007/s44227-023-00017-6>
11. Yuan J., Peng J., Yan Q., He G., Xiang H., Liu Z. Deep Reinforcement Learning-Based Energy Consumption Optimization for Peer-to-Peer (P2P) Communication in Wireless Sensor Networks. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No 5. P. 1632. <https://doi.org/10.3390/s24051632>.
12. Ávila B.Y.L., García-Vázquez C.A., Pérez Baluja O., et al. Energy harvesting techniques for wireless sensor networks: A systematic literature review. *Energy Strategy Reviews*. 2025. Art. 102065. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101617>
13. Antonova H. V. Computer program "Software application for forecasting energy consumption of a wireless sensor network "Energy Consumption Analyzer": certificate of copyright registration No. 142072. Ukraine; registered January 28, 2026.
14. Friis H.T. A Note on a Simple Transmission Formula. *Proceedings of the I.R.E. and Waves and Electrons*. May, 1946, P. 254–256. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1946.234568>
15. Rappaport T.S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR. 2002. Chapter 3. P. 69–104; Chapter 4. P. 107–108.
16. Recommendation ITU-R P.525-5 (11/2024). Calculation of free-space attenuation. P Series: Radio wave propagation. Geneva: ITU, 2024. 4 p. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.525-5-202411-I/en> (звернення: 02.10.2025).
17. Weissberger M.A. An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by trees. ESD-TR-81-101, EMC Analysis Center, Annapolis, MD, USA, 1982. <https://doi.org/10.21236/ADA118343>
18. Antonova H., Kedych A. Testing of the Wireless Sensor Network for the Express-Diagnostic of the State of Plant. *Cybernetics and Computer Technologies*. 2020. 3. P. 90–100. (in Ukrainian) <https://doi.org/10.34229/2707-451X.20.3.9>
19. Antonova H.V., Hrusha V.M., Kedych A.V., Kovyrova O.V. Methods and models for processing data from a wireless sensor network for plant condition assessment by chlorophyll fluorescence induction. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2026. Vol. 62, No. 1. P. 144–151. <https://doi.org/10.1007/s10559-026-00853-8>
20. Antonova H., Kedych A. Test Data of the Wireless Sensor Network for Express Diagnostics a State of Plant Based on the Chlorophyll Fluorescence Induction Effect [Data set]. Zenodo. 2025. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15591761>
21. Byrd R. H., Lu P., Nocedal J., Zhu C. A Limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*. 1995. 16 (5). P. 1190–1208. <https://doi.org/10.1137/0916069>

Received/Одержано 17.12.2025

Accepted/Прийнято 03.03.2026

Published/Надруковано 27.03.2026

Антонова Ганна Валеріївна,
молодший науковий співробітник
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ.
antanna78@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1876-8267>

UDC 681.7.08:535.3; 004.387:621.3.087.92

Hanna Antonova

A Comprehensive Concept of Energy Modeling for Wireless Sensor Networks

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv
Correspondence: antanna78@gmail.com

The paper proposes a comprehensive concept of energy modeling for wireless sensor networks (WSNs). A structural model of the node operating cycle is introduced, distinguishing between full and partial cycles, which enables clear separation of background and active energy consumption and improves modeling accuracy. A new multifactor mathematical model of WSN energy consumption over the vegetation period is developed and formalized simultaneously in scalar and matrix forms. This provides a unified description of network nodes, ensures network scalability, and accounts for variable operating modes.

Based on the multifactor model, a software application for predicting the energy consumption of a wireless sensor network, “*Energy Consumption Analyzer*”, has been developed. The Friis transmission equation is specialized, and a modified Weissberger model is calibrated to describe signal attenuation in a vegetation environment. On the basis of these models, a practically applicable signal attenuation model for vegetation environments of the orchard type is proposed, specifically adapted to the impact of this type of environment on radio signal propagation.

Empirical modeling based on experimental data and the synthesis of theoretical and empirical models are performed, enabling the solution of the inverse problem of determining the minimum required transmission power to ensure a given quality of service (QoS) and yielding an analytical model of adaptive power control. A dynamic model of WSN energy consumption is developed, establishing the relationship between energy expenditure and communication quality. A daily optimization coefficient for hierarchical power control is proposed, which forms the basis for a method to improve the energy efficiency of wireless sensor networks.

Keywords: wireless sensor networks, sensor node, radio signal, signal attenuation, energy consumption, modeling, empirical models, energy efficiency, precision agriculture.