

УДК 621.31; 621.37

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.1.34>**Ф. О. ПТАЩЕНКО**

доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри вищої математики і фізики
Національний університет «Одеська морська академія»
ORCID: 0000-0002-8203-0494

О. Ю. ПОПОВСЬКИЙ

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри вищої математики і фізики
Національний університет «Одеська морська академія»
ORCID: 0000-0003-0928-4452

А. А. ГОРЮК

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри вищої математики і фізики
Національний університет «Одеська морська академія»

В. П. ЗЕНЧЕНКО

кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри вищої математики і фізики
Національний університет «Одеська морська академія»

В. М. ПОЛОСІНА

старший викладач кафедри вищої математики і фізики
Національний університет «Одеська морська академія»

О. І. ВЕЛИКА

старший викладач кафедри корабельної енергетики
та електроенергетичних систем
Інститут Військово-морських сил
Національного університету «Одеська морська академія»

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЗОНАНСНИХ УМОВ ДЛЯ СИСТЕМ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ В УВЧ-ДІАПАЗОНІ

У роботі виконано чисельне моделювання системи бездротової передачі енергії у діапазоні ультрависоких частот (UHF) між двома кільцевими рамковими антенами, налаштованими на частоту 868 МГц. Такий діапазон широко використовується в технологіях радіочастотної ідентифікації (RFID) у країнах Єврозою та Україні, що забезпечує доступність апаратних засобів та дозволяє розглядати бездротове підзарядження малопотужних пристроїв як можливе доповнення до стандартної UHF-інфраструктури. Антени реалізуються на основі друкованої плати та забезпечуються підстроювальними індуктивностями поверхневого монтажу форм-фактору SMD 0805, що робить їх конструктивно простими, дешевими та технологічними для масового виробництва. Основна увага приділена впливу радіусу антен (2.5-6 см) і відстані між ними (1, 2 і 10 см) на коефіцієнт передачі потужності $|S_{21}|^2$, отриманий в рамках електродинамічного моделювання в програмному середовищі COMSOL Multiphysics. Показано, що при малих відстанях між антенами (1-2 см) існують оптимальні радіуси, які забезпечують максимальну передачу енергії (до 60-80%), що пов'язано з оптимальним балансом власної та взаємної індуктивності контурів. Для більшої відстані (10 см) ефективність передавання енергії закономірно знижується, але також спостерігається оптимум в області більших радіусів. Додатково досліджено залежність оптимальної підстроювальної індуктивності L_{OPT} від радіусу антени, що дозволяє визначити діапазон значень (40-110 нГн), сумісний зі стандартними компонентами SMD. Отримані результати демонструють можливість практичної оптимізації параметрів друкованих антен для ближньої бездротової передачі енергії в UHF-діапазоні та підтверджують ефективність чисельного моделювання як інструмент проектування подібних систем.

Ключові слова: бездротова передача енергії, UHF RFID, ефективність, оптимізація, моделювання, метод кінцевих елементів, COMSOL Multiphysics.

F. O. PTASHCHENKO

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Higher Mathematics and Physics
National University "Odesa Maritime Academy"
ORCID: 0000-0002-8203-0494

O. YU. POPOVSKII

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Higher Mathematics and Physics
National University "Odesa Maritime Academy"
ORCID: 0000-0003-0928-4452

A. A. GORYUK

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Higher Mathematics and Physics
National University "Odesa Maritime Academy"

V. P. ZENCHENKO

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor at the Department of Higher Mathematics and Physics
National University "Odesa Maritime Academy"

V. M. POLOSINA

Senior Lecturer at the Department of Physics and Chemistry
National University "Odesa Maritime Academy"

O. I. VELYKA

Senior Lecturer at the Department of Ship Power Engineering
and Electrical Power Systems
Institute of Military-Naval Forces
of National University "Odesa Maritime Academy"

MODELING AND OPTIMIZATION OF RESONANCE CONDITIONS FOR UHF WIRELESS POWER TRANSMISSION SYSTEMS

This paper presents a numerical simulation of a wireless power transmission system in the ultra-high frequency (UHF) range between two ring loop antennas tuned to a frequency of 868 MHz. This range is widely used in radio frequency identification (RFID) technologies in the European Union and Ukraine, ensuring the availability of hardware and allowing wireless charging of low-power devices to be considered as a possible addition to the standard UHF infrastructure. The antennas are implemented on a printed circuit board and equipped with surface-mount trimming inductors of the SMD 0805 form factor, making them simple in design, inexpensive, and technologically feasible for mass production. The main focus is on the influence of the antenna radius (2.5-6 cm) and the distance between them (1, 2, and 10 cm) on the power transfer coefficient $|S_{21}|^2$, obtained through electrodynamic modeling in the COMSOL Multiphysics software environment. It is shown that at small distances between antennas (1-2 cm), there are optimal radii that ensure maximum energy transfer (up to 60-80%), which is due to the optimal balance of the self- and mutual inductance of the circuits. For larger distances (10 cm), the energy transfer efficiency naturally decreases, but an optimum is also observed at larger radii. The dependence of the optimal L_{OPT} trimming inductance on the antenna radius was additionally studied, allowing us to determine a range of values (40-110 nH) compatible with standard SMD components. The obtained results demonstrate the feasibility of practical optimization of printed circuit antenna parameters for short-range wireless power transmission in the UHF range and confirm the effectiveness of numerical simulation as a design tool for such systems.

Key words: wireless power transmission, UHF RFID, efficiency, optimization, modeling, finite element method, COMSOL Multiphysics.

Постановка проблеми

Бездротова передача енергії (Wireless Power Transfer, WPT) стає все більш затребуваною технологією завдяки можливості живлення автономних пристроїв без використання дротів і батарей. Особливо актуальними є такі системи для інтернету речей (IoT), сенсорних вузлів та RFID-міток, де компактність, надійність та мінімальне обслуговування є ключовими вимогами. Частотний діапазон навколо 868 МГц (європейська частина UHF-діапазону RFID) є привабливим вибором для WPT: він широко використовується в стандартах RFID, що забезпечує доступність апаратного забезпечення (включаючи генератори, приймачі та антени), а також легальність експлуатації та

зрілі екосистеми. Такий частотний діапазон дозволяє проектувати антени помірних розмірів (кілька сантиметрів), зберігаючи достатню дальність і ефективність передачі енергії. Крім того, виготовлення приймально-передавальних антен на основі технологій друкованих плат та стандартних компонентів поверхневого монтажу (SMD) є відносно простим та недорогим. Застосування, наприклад, SMD-індуктивностей дозволяє легко вбудувати резонансні контури у стандартні плати, що спрощує прототипування та масштабування. Моделювання для оптимізації таких систем є дуже важливим: без чисельного аналізу неможливо точно визначити оптимальні геометричні параметри (радіус антен, форму, індуктивність), при яких досягається максимальна передача потужності. Оптимізація цих параметрів особливо критична в УВЧ-діапазоні через баланс між магнітною взаємною індуктивністю, втрачаними та недосконалим узгодженням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У літературі вже є ряд робіт, присвячених бездротовій передачі енергії та її поєднанню з RFID-системами, але оптимізація геометрії та параметрів саме UHF-систем залишається недостатньо вивченою. Аналіз гармонік у WPT для пасивних RFID проведено у [1], де розглянуто вплив нелінійних ефектів у пасивних UHF-RFID мітках, що виникають через передачу енергії, у тому числі гармоніки та їх використання для зв'язку. У [2] було обговорено теорію та експериментальні результати, пов'язані з нелінійністю випрямлячів у RFID-системах та їх вплив на енергонасичення. Кількісна оцінка ефективності передачі у UHF-системах на частоті 868 МГц була проведена у [3]. У [4] було проведено моделювання ближньої індуктивної передачі енергії між кільцевими WPT-антенами на частоті 868 МГц у медичних додатках, що демонструє придатність цього діапазону для компактних систем. У роботі [5] було описано сучасні досягнення в індуктивній передачі енергії, включаючи стратегії оптимізації зв'язку, узгодження та управління навантаженням. У роботі [6] представлено системний огляд сучасних систем бездротової передачі енергії – від ближнього до далекого поля, було обговорено виклики в ефективності, регулюванні та інтеграції. У [7] було розглянуто оптимізацію WPT-систем з індуктивним зв'язком, включаючи S-параметри та моделювання навантаження. У [8] було проведено дослідження дизайну UHF RFID антен на частоті 868 МГц, які можна було б застосовувати для мініатюрних пристроїв. Незважаючи на ці досягнення, оптимізація залежності передачі потужності від геометричного розміру антен (радіуса) та резонансної індуктивності в рамках UHF WPT-систем залишається недостатньо освітленою. Зокрема, мало робіт, що систематично варіюють радіус рамкових антен і підстроювальну індуктивність разом з відстанню між елементами для максимізації $|S_{21}|^2$.

Формулювання мети дослідження

При проведенні досліджень та аналізі їх результатів було поставлено наступні цілі:

- Виконати систематичне чисельне дослідження впливу радіусу кільцевих антен на коефіцієнт передачі енергії $|S_{21}|^2$ в системі WPT на частоті 868 МГц за різних відстаней між антенами (1 см, 2 см і 10 см).
- Визначити оптимальні значення радіусу антен та підстроювальної індуктивності L_{opt} , при яких досягається максимальна ефективність передачі для кожної з розглянутих відстаней.
- Проаналізувати, як зміна геометрії (радіусу) кільцевої антени впливає на необхідну підстроювальну індуктивність, необхідну для резонансного налаштування.
- Оцінити можливість практичної реалізації знайдених оптимальних параметрів з точки зору використання стандартних SMD-індуктивностей та друкованої технології.
- Запропонувати рекомендації для проектування компактних UHF WPT/RFID систем, що ґрунтуються на оптимізованих параметрах антен та їх узгодження.

Викладення основного матеріалу дослідження

Теоретичні основи моделювання. Моделювання електромагнітної взаємодії антен засноване на вирішенні системи рівнянь Максвелла в гармонічному (монохроматичному) наближенні. У припущенні синусоїдальної часової залежності всіх величин вигляду $\exp(j\omega t)$, диференціальні рівняння Максвелла зводяться до частотної форми, що містить комплексні електричні і магнітні поля $E(\omega)$ і $H(\omega)$. Ці рівняння утворюють замкнену систему, що зв'язує поля зі струмами, зарядами та властивостями матеріалів, і є фундаментом методу кінцевих елементів, реалізованого в COMSOL Multiphysics. Детальний опис використаних рівнянь хвильового типу, а також обговорення комплексних амплітуд, операторної форми та граничних умов наведено в роботі [9]. Тут відзначимо лише, що електромагнітна задача розв'язується в стаціонарному частотному формулюванні, що дозволяє обчислювати розподіли E , H , щільності потоку енергії і S-параметри при заданій частоті збудження. Таке наближення є повністю коректним для дослідження резонансних властивостей антен на фіксованій частоті (868 МГц) та їх енергетичного зв'язку за різних геометричних параметрів.

Для кількісного аналізу взаємодії двох рамкових антен у частотній області широко використовується формалізм S-параметрів (scattering parameters), який описує розподіл падаючих та відбитих хвиль у багатопортових високочастотних системах. У цій роботі використовується двопортова модель: перший порт збуджує передавальну антену, а другий реєструє сигнал, прийнятий другою антеною. Коефіцієнт відбиття S_{11} характеризує узгодження передавальної антени з джерелом сигналу. Коли $|S_{11}| \rightarrow 0$, відбиття потужності в передавальній антені буде

мінімальним, а введення потужності в антену буде найбільш ефективним; значення $|S_{11}| \approx 1$ вказують на суттєві неузгодження та низьку ефективність збудження. Коефіцієнт передачі S_{21} відображає здатність системи переносити електромагнітну енергію від передаючої до приймальної антени. Оскільки S_{11} та S_{21} є комплексними величинами, що містять як амплітуду, так і фазу, для енергетичного трактування використовується квадрат модуля коефіцієнта передачі:

$$|S_{21}|^2 = \frac{P_{\text{ПРИЙН}}}{P_{\text{ПІДВЕД}}}, \tag{1}$$

де $P_{\text{ПІДВЕД}}$ – потужність, що підводиться до передавальної антени, а $P_{\text{ПРИЙН}}$ – потужність, що надходить на вхід приймальної антени. Ця величина інтерпретується як частка переданої потужності, що робить її прямим показником ефективності бездротової передачі енергії. Саме тому в подальшому аналізі використовується модуль $|S_{21}|^2$: він дозволяє наочно порівнювати ефективність різних геометричних конфігурацій, відстаней між антенами та значень підстроювальної індуктивності, а також виявляти області параметрів, що забезпечують резонансну максимізацію енергетичного зв'язку.

Деталі моделювання. Моделювання бездротової передачі енергії було проведено у програмному середовищі COMSOL Multiphysics 6.2 з використанням модуля RF / Electromagnetic Waves, Frequency Domain, що дозволяє розв'язувати хвильові рівняння, отримані з системи рівнянь Максвелла в гармонічному наближенні.

Геометрія моделі представлена на рис. 1а. Система складається з двох кільцевих рамкових антен, розташованих коаксіально у вільному просторі на відстані (d), яке варіюється від 1 до 10 см. Антени реалізовані у вигляді мідних доріжок шириною 3 мм, сформованих на діелектричній підкладці товщиною 2 мм з політетрафторетилену (PTFE) з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_r = 2.1$. Оскільки товщина мідного шару (35 мкм) значно перевищує глибину скін-шару на частоті 868 МГц (близько 2.1 мкм), провідники моделювалися як ідеальний провідник (PEC), що знижувало обчислювальну складність без втрати точності. Кожна антена містила два розриви. У першому була змонтована підстроювальна індуктивність SMD-типу з форм-фактором 0805 – вона моделювалася як зосереджений елемент з індуктивністю (L). Значення індуктивності вибиралося таким, щоб забезпечити резонанс системи частоти 868 МГц при обраному радіусі антени. У другій точці розриву був розміщений зосереджений порт (lumped port) з хвильовим імпедансом $z = 50$ Ом. В першій антені порт служив джерелом збудження (1 В), другий використовується для вимірювання сигналу, що приймається, і розрахунку S -параметрів. Зовнішній простір навколо антен обмежено сферичною областю, на зовнішню поверхню якої нанесений поглинаючий шар PML (Perfectly Matched Layer) завтовшки не менше чверті довжини хвилі. Його завдання – запобігати відбиттю електромагнітної хвилі від меж моделі та імітувати умови випромінювання в нескінченній вільній простір. Розміри повітряної області вибиралися так, щоб відстань між PML і антенами була не меншою, ніж 0.5λ .

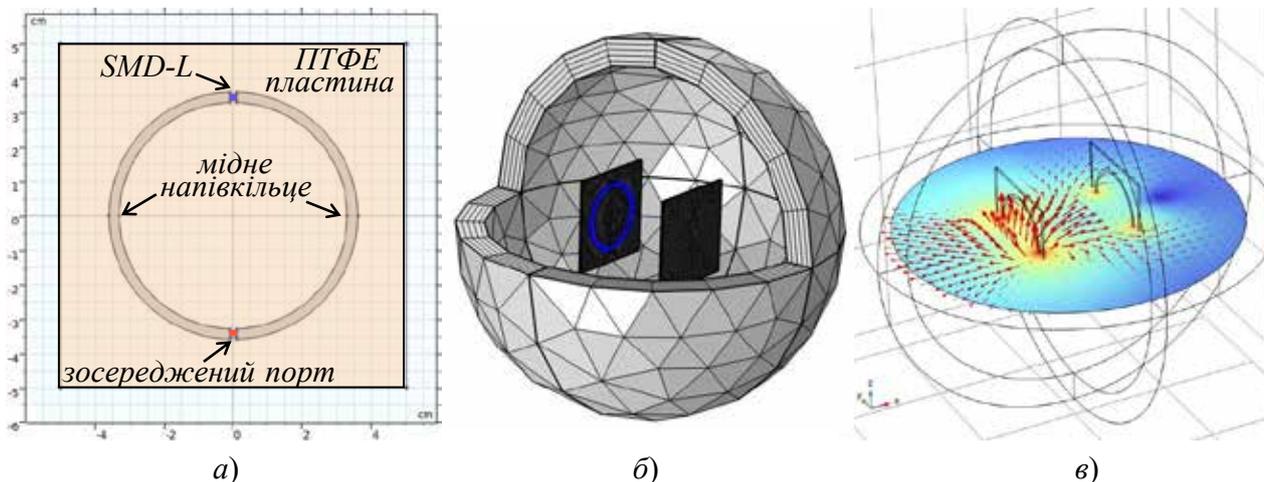


Рис. 1. а) – Схематичне зображення приймальної (передавальної) антени; б) – модельна область із розбиттям на кінцево-елементну сітку; в) – розподіл модуля середнього електричного поля у логарифмічному масштабі, стрілками показані напрямки векторів середнього за часом потоку енергії

Сітка кінцевих елементів представлена на рис. 1б. В областях, що прилягала до кільцевих антен та зосереджених елементів або портів, використовувалося локальне згущення сітки, що забезпечувало не менше 8-10 елементів на мінімальну довжину хвилі в матеріалі. Усередині PTFE-підкладки виконувалася додаткова адаптивна генерація, спрямована на коректне відтворення розподілу поля поблизу меж провідних елементів. Середня кількість

ступенів свободи у розрахунках становила $1.5 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^6$, що забезпечувало стійке і відтворюване рішення у всьому досліджуваному діапазоні параметрів.

Результати та обговорення. На рис. 1в показано розподіл амплітуди електричного поля $20 \log_{10}|E|$ у площині симетрії антен, а також векторний графік середнього потоку енергії (вектору Пойнтинга) $\vec{S} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*)$. Видно, що поле локалізовано поблизу кільцевих провідників і утворює характерну для зв'язаних резонаторів інтерференційну картину, а потік енергії направлений від передавальної антени до приймальної системи. За приймальною антеною можна бачити «тінь», яка свідчить, що значна частина енергії була поглинена приймачем. Ця візуалізація служить якісним підтвердженням коректного налаштування резонансного зв'язку і демонструє механізм передачі енергії у досліджуваній конфігурації системи.

На рис. 2а представлені розраховані залежності коефіцієнта передачі енергії $|S_{21}|^2$ від радіусу кільцевих антен r в діапазоні 2.5-6 см для трьох робочих відстаней між передавальною і приймальною антенами – 1 см, 2 см і 10 см. Як видно з графіка, потужність, що передається, істотно залежить як від геометричних параметрів антен, так і від відстані між ними. Для малих відстаней (1-2 см) спостерігається виражений максимум при радіусах близько 3.5-4.0 см. У цій області геометрична індуктивність контуру та взаємна індуктивність між антенами забезпечують оптимальне узгодження резонансних контурів при робочій частоті 868 МГц. Максимальні значення коефіцієнта передачі потужності досягають 0.8 при ($d=1$ см) та 0.6 при ($d=2$ см), що відповідає досить високій ефективності ближньої передачі енергії в УВЧ-діапазоні. При збільшенні відстані до 10 см значення $|S_{21}|^2$ зменшуються на порядок, що відповідає очікуваному зниженню коефіцієнта магнітного зв'язку між антенами. Однак навіть у цьому випадку спостерігається невеликий максимум в області $r \sim 4.5$ см, що свідчить про існування оптимального розміру контуру, при якому взаємна індуктивність залишається достатньою, щоб компенсувати втрати узгодження на далеких відстанях.

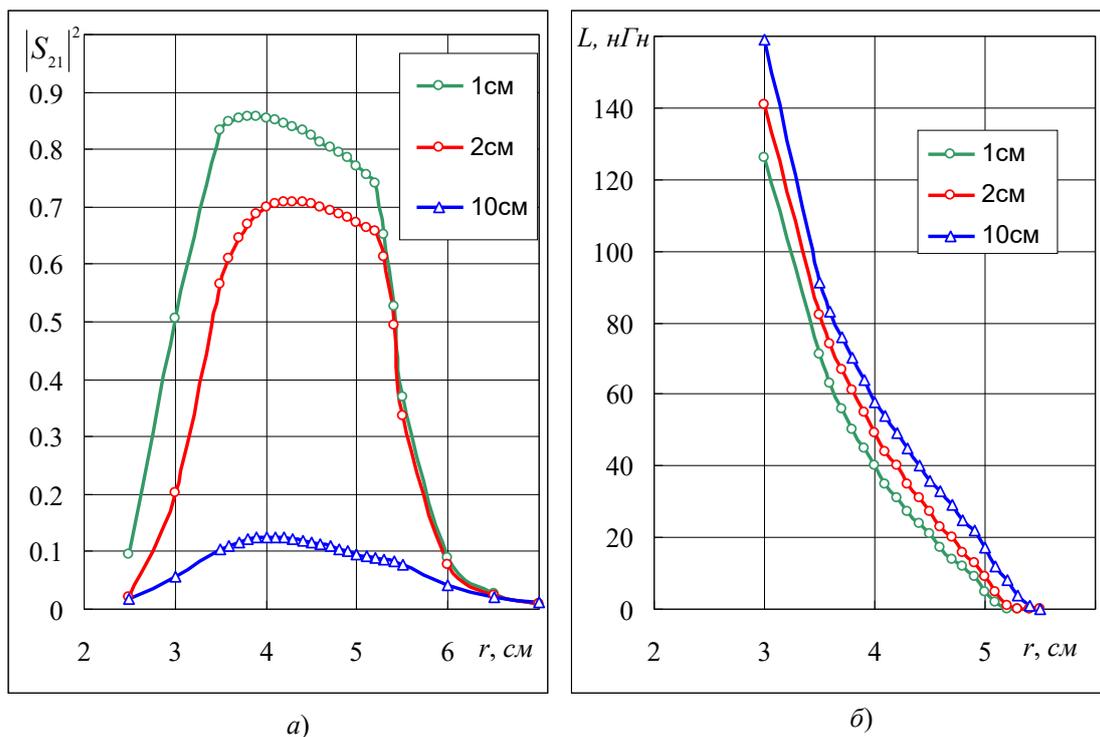


Рис. 2. Розраховані залежності коефіцієнта передачі енергії $|S_{21}|^2$ (а) та оптимальної підстроювальної індуктивності L_{OPT} (б) від радіусу r кільцевих антен для трьох відстаней між передавачем та приймачем – 1 см, 2 см та 10 см

На рис. 2б показана залежність оптимальної підстроювальної індуктивності L_{OPT} (яка забезпечує максимальне значення $|S_{21}|^2$) від радіусу антен. Для всіх трьох досліджених відстаней криві $L_{OPT}(r)$ демонструють монотонне зростання, що узгоджується з фізичною природою резонансного контуру: збільшення радіуса призводить до зростання індуктивності кільця і зниження його резонансної частоти, тому для відновлення резонансу на частоті 868 МГц потрібно збільшення величини підстроювальної індуктивності. При малих відстанях (1-2 см) оптимальна індуктивність змінюється в межах 40-110 нГн, що повністю відповідає доступним компонентам поверхневого монтажу (SMD-індуктивності типорозміру 0805). Це підтверджує можливість практичної реалізації

оптимізованих антен на основі стандартної технології друкованих плат. Для $d = 10$ см спостерігається більш різке зростання L_{OPT} , що пов'язано зі зменшенням взаємного впливу антен та ослабленням їхньої резонансної взаємодії.

Аналіз графіків рис. 2а та 2б показує, що оптимізація розмірів антен та підстроювальної індуктивності є ключовим фактором досягнення ефективної бездротової передачі енергії в УВЧ-діапазоні. При цьому важливу роль відіграють два фактори. Перший – геометрична настройка резонансу, що визначається радіусом антени та її власною індуктивністю. Другий – взаємна індуктивність, що залежить від відстані між антенами та визначає величину коефіцієнта зв'язку. У сукупності ці два фактори визначають форму кривих $|S_{21}|^2(r)$ і $L_{OPT}(r)$. Особливості поведінки кривих повністю узгоджуються з класичною теорією двох зв'язаних резонансних контурів і демонструють, що частотний діапазон 868 МГц залишається робочим навіть за суттєвих змін геометрії антен, що важливо для оптимізації систем WPT ближньої дії.

Висновки

У роботі проведено кінцево-елементне моделювання системи бездротової передачі енергії в діапазоні ультрависоких частот між двома кільцевими рамковими антенами, забезпеченими підстроювальними індуктивностями. На основі розрахунків встановлено, що ефективність передачі енергії визначається спільним впливом геометрії антен та відстані між ними, а також точно налаштування резонансних властивостей системи.

Показано, що для малих відстаней між антенами (1-2 см) існує область оптимальних радіусів антен (порядку 3.5-4 см), за яких коефіцієнт передачі потужності $|S_{21}|^2$ досягає максимальних значень – до 60-80% при частоті 868 МГц. Для кожного радіусу визначається певне значення підстроювальної індуктивності L_{OPT} , необхідне забезпечення резонансу. Залежність оптимальної індуктивності від радіусу антени $L_{OPT}(r)$ має монотонний характер і лежить у технологічно доступному діапазоні 40-110 нГн, що підтверджує можливість реалізації таких пристроїв на основі стандартних SMD-компонентів.

Для збільшених відстаней (до 10 см) рівень зв'язку закономірно знижується внаслідок зменшення взаємної індуктивності, проте резонансний характер залежності $|S_{21}|^2(r)$ зберігається, що вказує на можливість часткової геометричної компенсації ослабленого зв'язку. Це підкреслює важливість комплексної оптимізації параметрів антен, що включає вибір радіусу, відстані та підстроювальної індуктивності.

Отримані результати підтверджують, що запропонована методика моделювання є ефективним інструментом для аналізу та оптимізації бездротових систем передачі енергії ближньої дії в УВЧ-діапазоні. Чисельний підхід дозволяє цілеспрямовано підбирати параметри антен для досягнення необхідної ефективності, а також є основою подальших досліджень та інженерного проектування пристроїв даного класу.

Список використаної літератури

1. Andia Vera, M.; Duroc, Y.; Tedjini, S. Analysis and exploitation of harmonics in wireless power transfer: Passive UHF RFID case. *Wireless Power Transfer*, 1(2), 69–76 (2014). <https://doi.org/10.1017/wpt.2014.8>
2. Andia-Vera, M.; Duroc, Y.; Tedjini, S. Theory and experiment concerning the exploitation of rectification nonlinearity in wireless power transfer: The passive UHF RFID case. *Wireless Power Transfer*, 3(1), 3–12 (2016). <https://doi.org/10.1017/wpt.2016.1>
3. de Souza, R. M.; Tavares, T.; Carvalho, N. B. UHF RFID power transfer efficiency analysis for 868 MHz systems. *Electronics Letters*, 51(14), 1082–1084 (2015). <https://doi.org/10.1049/el.2015.0654>
4. Mehta, R., Dey, S., Dey, N. Near-field inductive wireless power transfer at ISM bands for biomedical applications. (2022). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29488.51209>
5. Khalid, H.; Farooq, U.; Naem, M.; et al. Recent trends in inductive wireless power transfer systems: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 58, 103464 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103464>
6. Van Mulders, J., Famaey, J., Lannoo, B., et al. Wireless power transfer: A review. *Sensors*, 22(15), 5573 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22155573>
7. Degen, M.; Kuster, N.; van de Burgwal, A.; et al. Analysis of inductively coupled resonant WPT systems for improved efficiency. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2021, 94 (2021). <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01994-4>
8. Dubok, A.; Smolders, A. B. Design and analysis of compact UHF RFID antennas for 868 MHz applications. (*Технічний звіт Eindhoven University of Technology*, 2014). <https://doi.org/10.6100/IR779026>
9. Птащенко Ф.О., Поповський О.Ю., Горюк А.А., Зенченко В.П., Полосіна В.М. (2025). Деякі аспекти моделювання втрат у осерді трансформатора за допомогою програмного модуля AC/DC Comsol Multyphysics. *Наука і техніка сьогодні (серія «Техніка») – 2024. № 13(41) 2024. С. 1214-1226*. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13\(41\)-1214-1226](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13(41)-1214-1226)

References

1. Andia Vera, M.; Duroc, Y.; Tedjini, S. Analysis and exploitation of harmonics in wireless power transfer: Passive UHF RFID case. *Wireless Power Transfer*, 1(2), 69–76 (2014). <https://doi.org/10.1017/wpt.2014.8>

2. Andia-Vera, M.; Duroc, Y.; Tedjini, S. Theory and experiment concerning the exploitation of rectification nonlinearity in wireless power transfer: The passive UHF RFID case. *Wireless Power Transfer*, 3(1), 3–12 (2016). <https://doi.org/10.1017/wpt.2016.1>
3. de Souza, R. M.; Tavares, T.; Carvalho, N. B. UHF RFID power transfer efficiency analysis for 868 MHz systems. *Electronics Letters*, 51(14), 1082–1084 (2015). <https://doi.org/10.1049/el.2015.0654>
4. Mehta, R., Dey, S., Dey, N. Near-field inductive wireless power transfer at ISM bands for biomedical applications. (2022). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29488.51209>
5. Khalid, H.; Farooq, U.; Naem, M.; et al. Recent trends in inductive wireless power transfer systems: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 58, 103464 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103464>
6. Van Mulders, J., Famaey, J., Lannoo, B., et al. Wireless power transfer: A review. *Sensors*, 22(15), 5573 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22155573>
7. Degen, M.; Kuster, N.; van de Burgwal, A.; et al. Analysis of inductively coupled resonant WPT systems for improved efficiency. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2021, 94 (2021). <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01994-4>
8. Dubok, A.; Smolders, A. B. Design and analysis of compact UHF RFID antennas for 868 MHz applications. (*Technical report Eindhoven University of Technology*, 2014). <https://doi.org/10.6100/IR779026>
9. Ptashchenko F.O., Popovskii O.Yu., Goruyk A.A., Zenchenko V.P., Polosina V.M. (2024). Dejaki aspekty modeluvannya vtrat u oserdy transformatora za dopomogou programnogo modulia AC/DC Comsol Multyphysics [Some aspects of modeling losses in the transformer core using the Comsol Multyphysics AC/DC software module]. *Nauka I tekhika siogodni (cerija «Tekhnika»)* – Science and Technology Today (Technology Series) – 2024. № 13(41) 2024. C. 1214-1226 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13\(41\)-1214-1226](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13(41)-1214-1226)

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 14.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025