

*В.О. АЛЕКСЄЄВ, Д.В. ГРЕЦЬКИХ, д-р техн. наук,
Д.С. ГАВВА, канд. техн. наук, В.Г. ЛИХОГРАЙ, канд. фіз.-мат. наук*

ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗПРОВІДНОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ

Вступ

Безпровідна передача енергії (БПЕ) має вже свою порівняно довгу історію і стала одним з актуальних напрямків в науці і техніці, що стрімко розвивається. Початком цього послужив винахід В. Брауном ректени, яка знайшла успішне застосування в різних галузях БПЕ. До основних з них відносяться: передача енергії сфокусованим мікрохвильовим променем на Землю зі сонячних космічних електростанцій, або на стратосферні ретранслятори, а потім на Землю та наступне її перетворення в постійний струм ректенами; енергопостачання БПЛА (від малорозмірних до стратегічних, у тому числі й висотних ретрансляційних платформ) сфокусованим мікрохвильовим променем з поверхні Землі, де ректена є енергоустановкою цих БПЛА; передача енергії сфокусованим мікрохвильовим променем до важкодоступних об'єктів (об'єкти можуть розміщатися високо в горах, на островах морів і великих озер, а також в інших місцях, до яких з технічних, економічних або інших причин створення повітряних, надводних, підземних і підводних ліній передачі електроенергії неможливе або недоцільне). Освоєння більш високочастотних діапазонів радіо- та оптичного випромінювань, впровадження нових технологій в області мікро- і наноелектроніки, розвиток безпровідного зв'язку стимулювало появу нових напрямків БПЕ і дозволило по-новому поглянути на існуючі. В даний час можна вже виділити ряд технологій БПЕ, що стрімко розвиваються і відрізняються між собою за технічною реалізацією систем БПЕ, вирішуваними ними задачами, діапазоном робочих частот та режимом роботи їх передавальних і приймальних підсистем.

Умовно стаття складається з трьох частин. У першій частині наведено літературний огляд різних технологій БПЕ, а саме – їх особливостей, галузей застосування та тенденцій подальшого розвитку. У другій частині наведено результати досліджень, проведених у Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ) в напрямку створення математичної моделі (ММ), що дозволяє проводити з єдиних позицій аналіз та оптимізацію систем БПЕ, в яких використовуються різні технології передачі енергії. У третій частині наведено нові результати, пов'язані з перевіркою адекватності розробленої колективом ХНУРЕ нелінійної ММ електродинамічного рівня системи БПЕ шляхом порівняння результатів розрахунків щодо розробленої моделі з відомими експериментальними даними.

1. Види технологій безпровідної передачі енергії

Безпровідна передача енергії – це загальний термін для ряду різних технологій передачі енергії за допомогою електромагнітних полів (ЕМП) [1, 2]. Під технологією передачі енергії будемо розуміти сукупність різних методів, що використовують ЕМП для передачі енергії [1, 3, 4]. Одними з чинників, що визначають вибір тієї або іншої технології передачі енергії (рис. 1), є відстань, на яку передається енергія (передача енергії в ближній зоні, зонах Френеля та Фраунгофера [5]) та вид використовуваної електромагнітної енергії (ЕМЕ).

У ближньому полі (ближня зона) енергія передається на короткі відстані за допомогою змінних магнітних полів з використанням індуктивного зв'язку між витками проводу, або змінними електричними полями (рис. 2) з використанням ємнісного зв'язку між металевими електродами. Порядком робочих частот таких систем БПЕ – Гц – МГц.

У проміжному та дальньому полі (зона Френеля та зона Фраунгофера) енергія передається електромагнітними хвилями (ЕМХ) радіо- або оптичного діапазону (у даній статті системи БПЕ і їхні компоненти оптичного діапазону [6 – 13] не розглядатимуться).

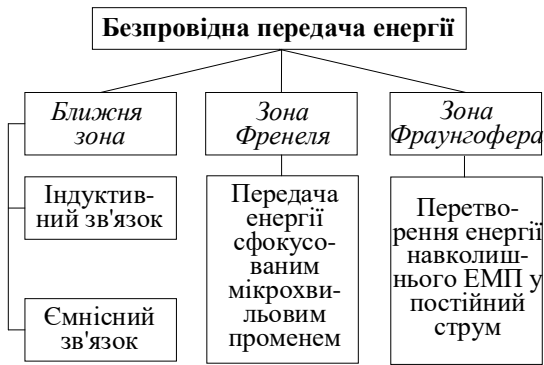


Рис. 1. Технології безпроводної передачі енергії

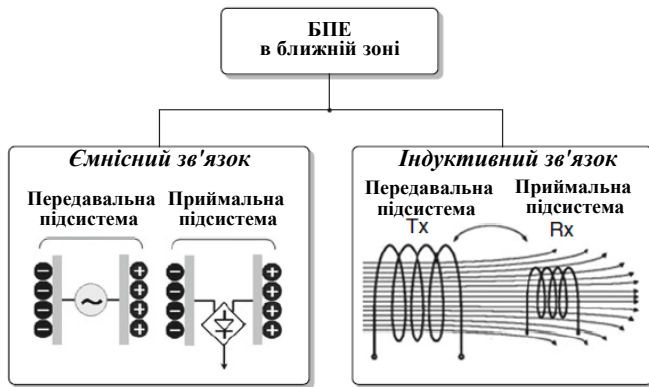


Рис. 2. Способи БПЕ в ближній зоні

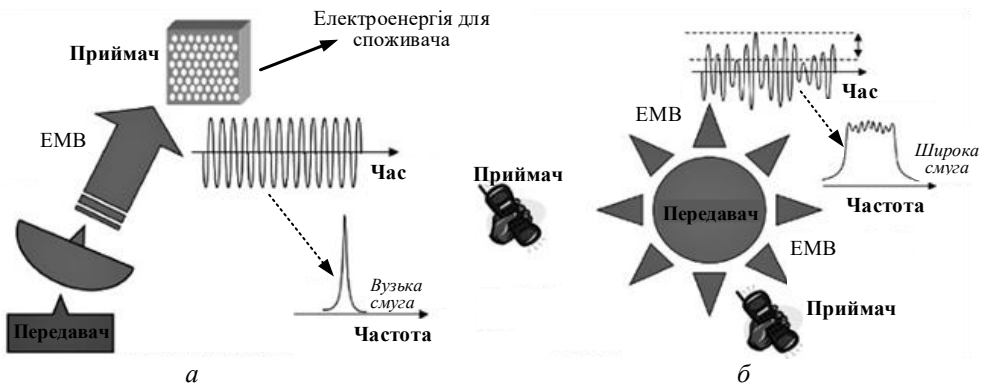


Рис. 3. Технологія БПЕ сфокусованим мікрохвильовим променем у зоні Френеля – а та збір енергії з навколишнього ЕМП у зоні Фраунгофера – б

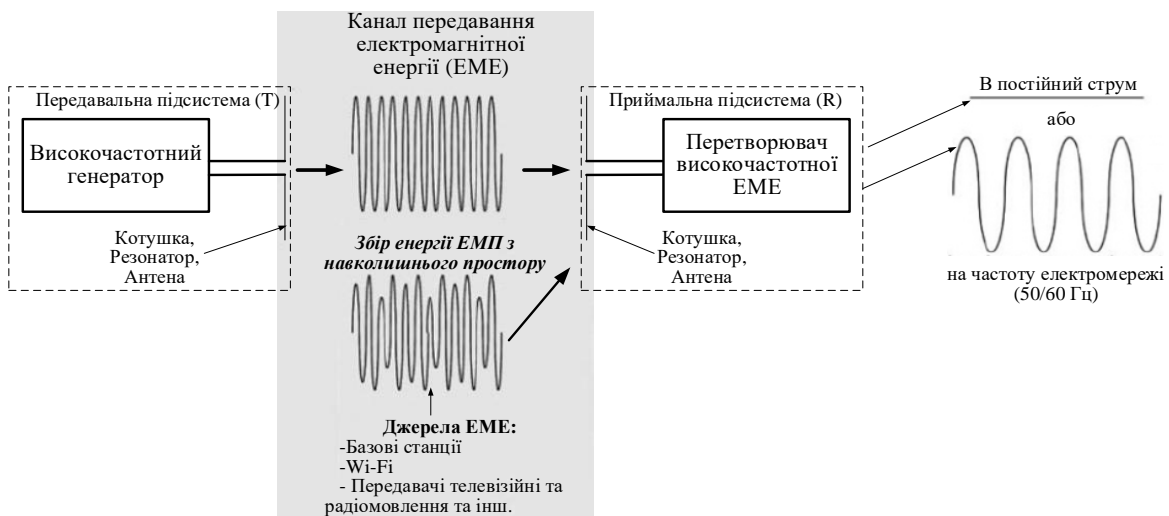


Рис. 4. Узагальнена структурна схема системи БПЕ

На рис. 3 схематично пояснюється суть технології БПЕ сфокусованим мікрохвильовим променем у зоні Френеля (енергія за допомогою спеціального радіопередавального пристрою передається на одній частоті) і технології збору ЕМЕ з навколишнього середовища (відбувається збір ЕМЕ з навколишнього середовища, яка створюється радіопередавальними пристроями радіоелектронних систем (РЕС) того або іншого призначення та подальше перетворення її в постійний струм).

Загальним для всіх технологій БПЕ є те, що вони засновані на перетворенні височастотних ЕМП у постійний струм або на частоту електромережі (50/60 Гц). Різницею між ними є діапазон робочих частот, природа первинних джерел енергії, відстань передачі енергії та пристрої для передачі, приймання й перетворення електромагнітної енергії, що використовуються в системах БПЕ. Таким чином, узагальнену схему системи БПЕ можна подати як на рис. 4.

2. Галузі застосування технологій БПЕ

2.1. Безпроводна передача енергії в ближній зоні

За останнє десятиліття дослідницький інтерес до передачі енергії в ближній зоні сильно зріс. Розробляються, удосконалюються та серійно випускаються безпроводні зарядні пристрої для мобільних телефонів, планшетів, смарт-годинників та інших пристроїв побутової електроніки [14]. Застосування безпроводної передачі енергії має багато переваг при зарядці акумуляторів електромобілів [15 – 19]. Велику увагу з боку як наукового середовища, так і промисловості приваблюють системи підводного безпроводного енергопостачання глибоководних безпілотних апаратів (рис. 5) [20]. Інтелектуальні системи моніторингу здоров'я, які можна носити або приєднувати до тіла людини (рис. 6), вважаються наступним поколінням персональних портативних пристроїв для дистанційної медичної практики [21]. Щоб забезпечити довгострокову роботу передових біоелектронних пристроїв, які імплантуються у людське тіло, актуальним є рішення завдань щодо організації їхнього безпроводного живлення [22 – 27].

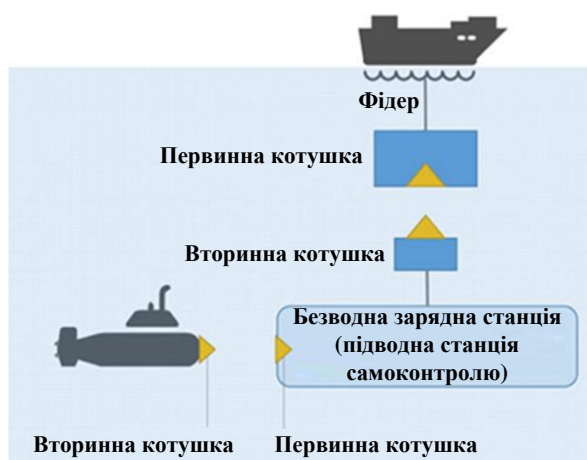


Рис. 5. Система БПЕ для живлення безпілотних підводних апаратів

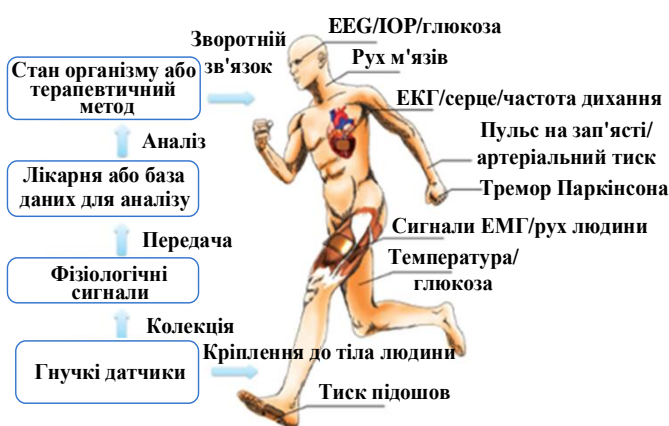


Рис. 6. Медичні датчики на тілі людини

2.2. Безпроводна передача енергії в зоні Френеля

Ідея безпроводної передачі енергії мікрохвильовим променем отримала практичне втілення у 60-і роки ХХ ст. у зв'язку з розвитком радіолокації, освоєнням мікрохвильового

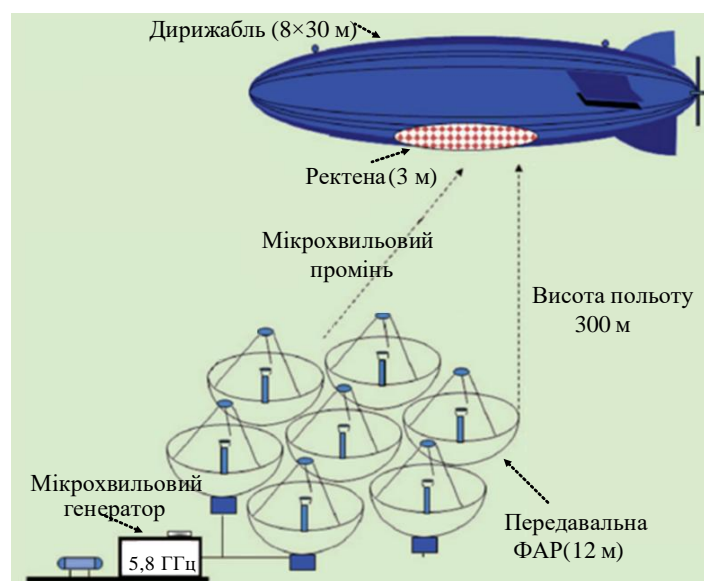


Рис. 7. Демонстрація польоту дирижабля, що живиться мікрохвильовим променем [47]

діапазону хвиль та у зв'язку з винаходом В. Брауном антени-випрямляча (ректени) [28, 29]. Результатом його робіт стало створення нового класу енергетичних систем – систем БПЕ мікрохвильовим променем. Такі системи складаються з передавальної підсистеми, завданням якої є перетворення енергії первинного джерела в енергію сфокусованого ЕМВ, та приймальної підсистеми у вигляді ректени, що розташована у зоні Френеля (рис. 3, а). Завданням ректени є приймання і перетворення сфокусованого ЕМВ в постійний струм, що надходить до споживача енергії.

Галузі застосування систем БПЕ мікрохвильовим променем різноманітні. По-перше це створення альтернативних джерел енергії – сонячних космічних електростанцій (СКЕС), енергія з яких повинна передаватися сфокусованим мікрохвильовим променем і прийматися наземними ректенними системами [1, 30 – 34]. В [35] зазначена гостра необхідність у найближчій перспективі почати практичну реалізацію проектів СКЕС, зокрема, відзначені серйозні наміри США та Японії створити вже незабаром (до 2025 р.) потужні СКЕС. По-друге це безпроводна передача енергії до важкодоступних наземних об'єктів [36 – 41]. По-третє, дистанційне енергопостачання об'єктів, які знаходяться тривалий час в повітрі (рис. 7) [42 – 51] та ін.

2.3. Безпроводна передача енергії в зоні Фраунгофера (збір ЕМЕ з навколишнього простору)

В останні роки активно провадяться дослідження технології збору енергії ЕМП в

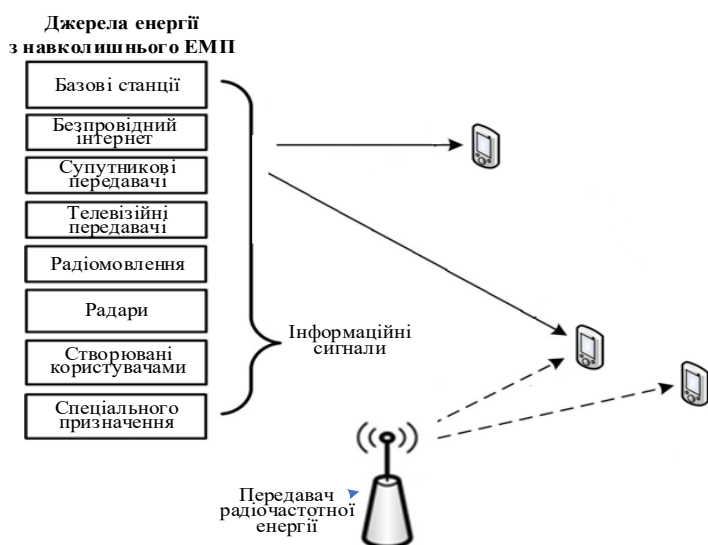


Рис. 8. Енергопостачання малопотужних пристроїв за рахунок видобування енергії з навколишнього ЕМП

навколишньому середовищі [52] та перетворення її у постійний струм. Збір енергії ЕМП можна розділити на два типи: збір зовнішньої радіочастотної (РЧ) енергії та спеціальний збір РЧ енергії. Збір зовнішньої РЧ енергії, пов'язаний з джерелами, наявними в навколишньому середовищі (базові станції GSM, Wi-Fi, цифрове телебачення, радіомовлення, тощо (рис. 8)). Якщо навколишні джерела ЕМП не забезпечують достатньої кількості енергії для задоволення вимог додатків, то використовується спеціальний збір необхідної

кількості енергії за допомогою створення додаткових джерел (передавач радіочастотної енергії (рис. 8)). Як приклад застосування останнього підходу можна навести запропоновану у [53, 54] систему контролю підвіски автомобіля на основі технологій БПЕ. Однак, як зазначено у [52], цей вид спеціальної системи збору енергії може призвести до великих витрат, особливо у випадку великомасштабних мереж, де може знадобитися встановлення великої кількості таких джерел.

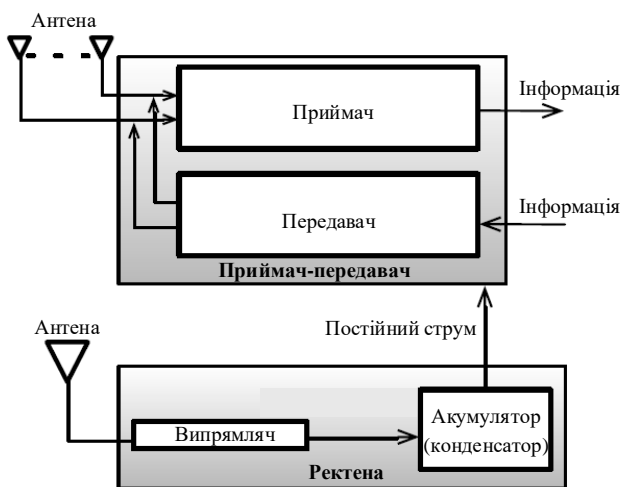


Рис. 9. Архітектура вузла з безпроводним живленням

Енергія, що вилучена з навколишнього простору, може використовуватися безпосередньо або накопичуватися і зберігатися для подальшого використання, що дозволяє реалізувати альтернативні джерела енергії для тих місць, де немає енергетичних систем, або виникають труднощі енергоживлення різного характеру.

На рис. 9 наведено приклад побудови типового вузла мережі датчиків з безпроводним живленням. Енергія, що вилучена з навколишнього простору, може використовуватися безпосередньо або накопичуватися і зберігатися для подальшого використання, що дозволяє реалізувати альтернативні джерела енергії для тих місць, де немає енергетичних систем, або виникають труднощі енергоживлення різного характеру.

Актуальність вирішення завдань

збору енергії пов'язана з тим, що більшість електронних пристроїв, таких як датчики в промислових, комерційних і медичних додатках (наприклад, моніторингу забруднення повітря, лісових пожеж, контролю стану різних механізмів, устаткування та будівельних споруд і т.п.), безпроводні пристрої та інші схеми з низьким енергоспоживанням, живляться від батарей. Однак навіть дуже якісні батареї мають обмежений термін використання. Заміна батарей стає "дорогим задоволенням", коли у віддалених місцях знаходяться сотні датчиків. Крім цього виникають нагальні екологічні проблеми, пов'язані з утилізацією відпрацьованих батарей. Застосування ж технологій збору ЕМЕ, що створюється РЕС різного класу та призначення, практично не потребує технічного обслуговування цього устаткування є економічно ефективним (застосовуючи технології збору енергії, пристрої та обладнання можуть стати самокупними по відношенню до енергії, необхідної для роботи, тим самим забезпечується практично необмежений термін експлуатації) і привабливим з точки зору екологічної безпеки.

Ряд виробників вже пропонують для ринку комерційні рішення систем збору енергії [55 – 58]. Експериментальні оцінки енергетичних параметрів системи збору РЧ енергії, які зроблені деякими дослідниками, узагальнені в табл. 1. Бачимо, що дана технологія має найменшу енергоємність у порівнянні з іншими. Оскільки схеми збору енергії призначені для роботи з відносно невеликими напругами та струмами, вони покладаються на сучасну елементну базу для досягнення високої ефективності перетворення ЕМП у постійний струм.

Таблиця 1

Потужність передавача	Частота	Відстань	Потужність у навантаженні ректени
4 В [59]	902–928 МГц	15 м	5.5 мкВт
1,78 В [60]	868 МГц	25 м	2.3 мкВт
1,78 В [55]	868 МГц	27 м	2 мкВт
3 В [61]	915 МГц	5 м	189 мкВт
3 В [61]	915 МГц	11 м	1 мкВт
960 кВ (ТВ-вишка) [62]	674–680 МГц	4,1 км	60 мкВт

Технологія збору РЧ енергії має безліч практичних застосувань. Коротко розглянемо деякі з них.

Інтернет речей (IoT) (англ. Internet of Things) [63] прокладає шлях до повсюдних послуг у різних сферах життєдіяльності, однак при цьому виникають проблеми в досягненні енергоефективної роботи пристроїв IoT [64]. В [65] підкреслюється актуальність застосування технології збору енергії в додатках IoT, розглядаються різні джерела енергії та методи її збору. Робота [66] присвячена розрахунку вузлів IoT на надзвичайно низькі споживання потужності за рахунок використання джерел енергії з навколишнього простору. Автори описали сучасний стан справ у даній галузі й дали чітке уявлення про методи енергозбереження та подальшої стратегії розвитку «зеленого» IoT. В [67] автори виступають за те, що збір енергії з навколишнього середовища може бути єдиним життєздатним варіантом для продовження терміну служби великомасштабних взаємозалежних мереж IoT.

Автоматизація промисловості. Енергія є ключовим чинником розвитку Індустрії 4.0 шляхом інтеграції обчислювальних процесів з фізичними процесами в інтелектуальному виробничому середовищі. У такому середовищі використовуються різні інтелектуальні пристрої для моніторингу фізичних виробничих процесів, які постійно задіяні в енергоємних операціях [68]. Енергоємна операція для цих пристроїв, які в основному живляться від батарей [69], є критичним місцем їх енергоефективної роботи. Автори роботи [69] пропонують усунути цю критичну ланку за рахунок застосування технології збору енергії з навколишнього простору. В [70] запропонована концепція оптимізації виробничих операцій у рамках розумної промисловості шляхом збору РЧ енергії в декількох місцях виробництва. Зібрана енергія подається у мікроелектромеханічні системи (МЕМС) і датчики, які встановлені на виробничій лінії. Таким чином, система збору енергії може зменшити трудовитрати на технічне обслуговування та експлуатацію, пов'язані із частим

перезарядженням акумуляторів або заміною батарей. У рамках такої ж концепції автори в [71] описують ряд технологій збору енергії, що підходять для автоматизації промисловості, досліджують енергоспоживання невеликих сенсорних пристроїв, розгорнутих у виробничому цеху, а потім оцінюють потенціал збору енергії, який можна використати в промислових процесах.

Практична схема збору та керування радіочастотною енергією для безпроводних сенсорних мереж (БСМ) на основі поліпшеного алгоритму маршрутизації з високою енергоефективністю запропонована в [72]. Автори брали до уваги необхідне енергоспоживання сенсорних вузлів, доступність РЧ енергії, оцінювали статистику зміни рівня густини потоку потужності, запас зібраної енергії в контексті побудови БСМ. Подібні дослідження проводилися й у [73], де були викладені основні вимоги та принципи енергоживлення пристроїв БСМ шляхом збору РЧ енергії. В [74] наведений огляд різних джерел енергії з навколишнього середовища для живлення пристроїв БСМ. Автори роботи стверджують, що рівень потужності 10 – 100 мкВт хоч і малий, але цілком достатній для реалізації ряду додатків на основі БСМ.

Медична інформатика. Веб-рішення для охорони здоров'я в сполученні з інтелектуальними системами на основі IoT забезпечують універсальний доступ до даних для лікарів та лабораторій по всьому світу [75]. У цій прикладній галузі були численні реалізації вузлів натільних комп'ютерних мереж (англ. body area network, безпроводна натільна комп'ютерна мережа WBAN) [76 – 79] і медичних пристроїв, що носять на тілі людини [80 – 82], включаючи системи для моніторингу стану здоров'я пацієнтів і безпроводних інтелектуальних механізмів ін'єкцій [76 – 79]. Завдяки інтеграції можливості збору РЧ енергії, малопотужні медичні пристрої можуть надавати дані по запиту в режимі реального часу. В [76] розроблена конструкція системи енергопостачання датчика WBAN, який складається з невеликої тридіапазонної антени та тридіапазонного випрямляча з ефективністю перетворення 59 % при вхідній потужності -10 дБм. Запропонований датчик компактний і підходить для самоконтролю тіла людини. В [80] наведено всебічний огляд як наукової літератури, так і наявних у продажі пристроїв збору РЧ енергії для живлення медичних пристроїв, що носять на тілі людини.

Радіочастотна ідентифікація (RFID) (англ. Radio Frequency IDentification) – є однією зі зрілих безпроводних технологій малого радіуса дії, у якій дані кодуються в цифровому виді в невеликих радіотранспондерах (також відомих як мітки або смарт-мітки). RFID належить до технологічного сімейства автоматичної ідентифікації та збору даних, де мітки не повинні перебувати в межах прямої видимості для зчитування даних.

Виявлено безліч робіт, у яких використовується збір РЧ енергії в різних додатках RFID [83 – 90]. В [83] докладно описується ряд різних міток RFID і відзначається необхідність збору РЧ енергії для живлення активних міток RFID. В [84] збір РЧ енергії визначений як джерело «зеленої» енергії, що підходить для ряду сенсорних додатків у суворих умовах. Всебічний огляд досягнень щодо реалізації RFID-датчиків з особливим акцентом на збір РЧ енергії наведений в [85]. Авторами роботи [83] описана трифазна система збору енергії, у якій використовується дводіапазонна антена (900 МГц, 2,45 ГГц). Ефективність перетворення РЧ енергії в постійну напругу 30 % на частоті 2,4 ГГц. У роботі [87] обговорюють конструкцію ректени для RFID. Ректена перетворює у постійний струм електромагнітну енергію, створювану джерелами, що працюють на частоті 2,45 ГГц. Автори у [89] описують систему збору РЧ енергії для RFID-міток з ефективністю перетворення 50 %.

Розумні будинки та моніторинг стану конструкцій. Розумний будинок зазвичай ставиться до структури, що використовує автоматизовані процеси для керування його роботою (наприклад, опаленням, вентиляцією, освітленням, кондиціонуванням повітря, безпекою й т.п.). Це дозволяє забезпечити зв'язок між будинком і мешканцями для поліпшення умов їхнього життя, підвищення енергоефективності будинку, виявити потенційні ризики, пов'язані з конструкцією будинку [91]. У роботах [92 – 96] обговорюється

перевага збору РЧ енергії для живлення датчиків, розгорнутих у будівельних конструкціях, у порівнянні з високими витратами на обслуговування акумуляторів. Оскільки датчики часто встановлюються в недоступних місцях усередині будинку або конструкції [94]. Автори у [93, 94] демонструють впровадження датчиків як частини кіберфізичних систем [68] для реалізації моніторингу стану конструкції розумних будинків. Мережі датчиків складаються із прототипів LoRaWAN без батареї, які живляться від системи збору РЧ енергії. В [95] розроблена конструкція компактної ректени площею 66 см², яка працює на частоті 868 МГц для додатків моніторингу стану конструкцій будинків. В роботі [96] викладені досягнення в галузі збору енергії з навколишнього середовища, яка використовується для живлення датчиків у додатках моніторингу стану конструкції будівель.

3. Параметри систем збору радіочастотної енергії

Розглянемо основні параметри, що характеризують систему збору РЧ енергії (рис.10).

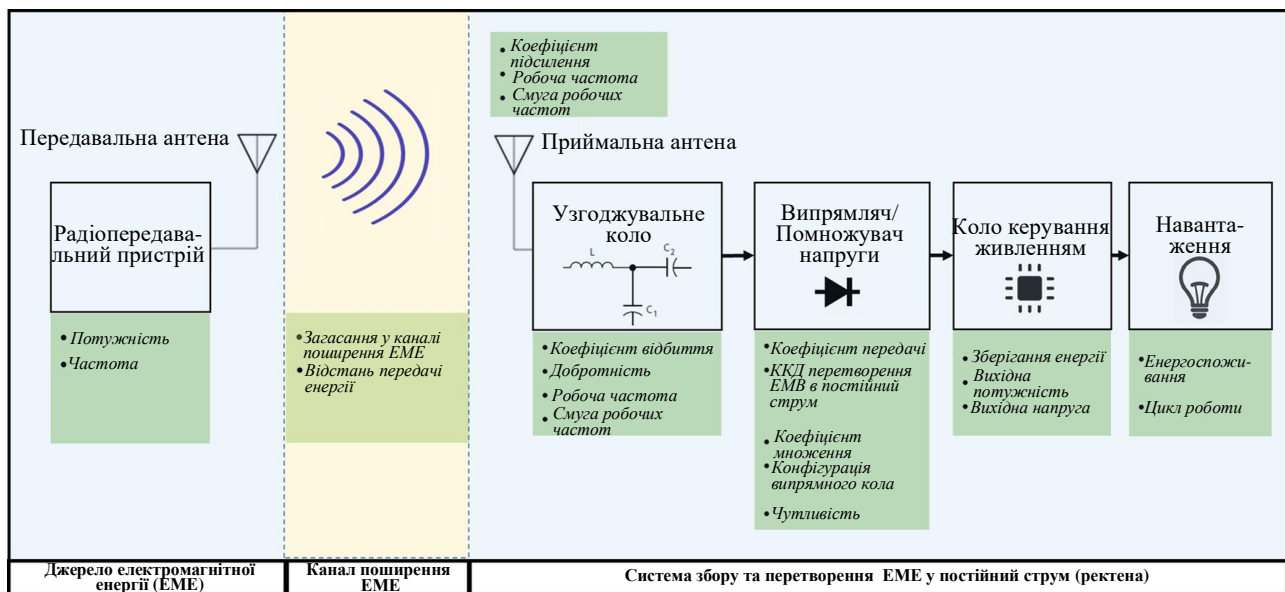


Рис. 10. Структурна схема системи збору електромагнітної енергії

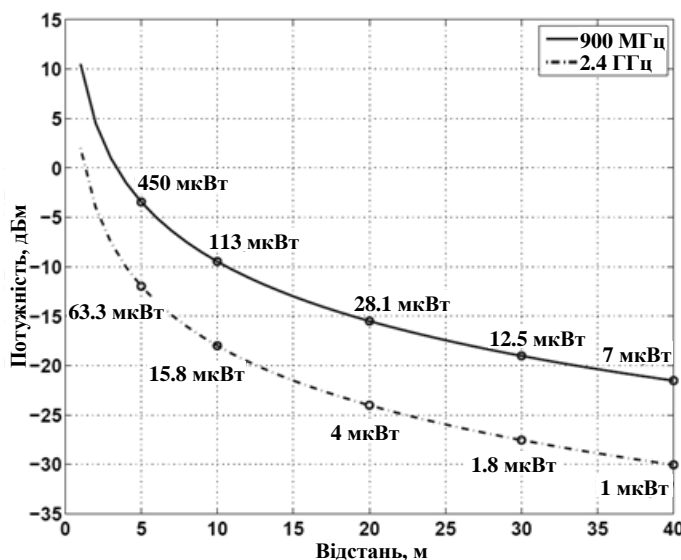


Рис. 11. Вплив відстані на потужність, що приймається при зборі РЧ енергії

Відстань передачі ЕМЕ здебільшого залежить від робочої частоти. Відомо, що загасання при передачі ЕМЕ у атмосфері на високих частотах більше, ніж на низьких частотах (рис. 11 [52]). ЕМХ на низьких частотах проникають глибше у матерію, що необхідно враховувати, якщо технології збору енергії застосовуються для імплантованих пристроїв у тіло людини.

ККД перетворення ЕМЕ в постійний струм (або ККД випрямлення) визначається таким чином

$$\eta_B = \frac{P_0}{P_{ВХ}}, \quad (1)$$

де P_0 – потужність постійного струму в навантаженні ректени; $P_{\text{вх}} = P_{\text{макс}} = \frac{e_a^2}{8R_a(f_0)}$ – максимальна потужність, яку може витягти випромінювач ректени з поля падаючої ЕМХ; e_a – амплітуда напруги холостого ходу, що наводиться падаючою хвилею на клеммах випромінювача; $R_a(f_0)$ – активна частина вхідного опору випромінювача на робочій частоті f_0 .

Рівень побічного випромінювання ректени

$$\xi(nf_0) = \frac{P_{\Sigma}(nf_0)}{P_{\text{вх}}}, \quad n = 2, 3, \dots, \quad (2)$$

де $P_{\Sigma}(nf_0)$ – потужність, яку випромінює ректена на частоті n -ї гармоніки.

Потужність постійного струму в навантаженні ректени відрізняється від $P_{\text{вх}}$ на величину потужності втрат, яка, в свою чергу, складається з потужності втрат в випрямному елементі, потужності втрат в елементах вхідного фільтру (узгоджувальному колі), потужності втрат в елементах вихідного фільтра, потужності, що втрачається за рахунок випромінювання ректенного елемента на частотах вищих гармонік і за рахунок проходження цих гармонік в навантаження, а також потужності, що перевипромінена ректенним елементом на основній частоті. У зв'язку із цим визначальними принципами при розробці ректен є досягнення високого ККД ректени, мінімізація випромінювання на частотах гармонік, простота конструкції, прийнятні масогабаритні показники, низька вартість, надійність і придатність для серійного виробництва. ККД випрямлення залежить від рівня падаючої потужності, опору навантаження, способу включення випрямного діода в схему і т.д. [97, 98]. У [98] відзначено, що на енергетичні характеристики ректен впливають численні фактори і є три взаємопов'язані рівня вирішення проблеми створення якісних ректен: перший – поліпшення параметрів окремих випрямних елементів, другий – оптимізація параметрів і характеристик окремих ректенних елементів, третій – оптимізація характеристик усієї ректени в цілому.

За наявності втрат в резонансних узгоджувальних колах (рис. 10) з часом амплітуда коливань зменшується за експоненціальним законом. Швидкість зміни накопиченої енергії в резонансному колі характеризують власною добротністю, яку знаходять за формулами [99]:

$$Q_0 = \omega_0 \frac{W_{\text{нак}}}{P_{\text{втр}}} = 2\pi \frac{W_{\text{нак}}}{\Delta W} \quad \text{або} \quad Q_0 = \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (3)$$

де $W_{\text{нак}}$ – енергія, що накопичена у резонансному колі; $P_{\text{втр}}$ – потужність втрат енергії в резонансному колі; $\Delta W = TP_{\text{втр}}$ – зміна енергії ЕМП в резонансному колі за один період коливань T ; f_0 та Δf – частота настройки резонансного (узгоджувального) кола (рис. 10) та його смуга пропускання відповідно.

Для потужних систем БПЕ сфокусованим мікрохвильовим променем вводиться такий параметр як гранично допустимий рівень густини потоку падаючої потужності Π_d на ректену, що визначається можливостями випрямного діода Шотткі (допустимими значеннями вхідної потужності P_d , прямого струму I_d і зворотної напруги U_d , при перевищенні яких діод пробивається). Системи БПЕ малої потужності (системи збору РЧ енергії) потрібно характеризувати таким параметром як чутливість [52]. Чутливість визначається як мінімальна падаюча потужність, яка необхідна для запуску роботи системи збору енергії. Тобто це здатність збирати енергію та працювати з низькою падаючою

на ректену густиною потоку потужності. Чим вища чутливість системи збирання, тим краща ефективність перетворення потужності падаючого на ректену ЕМВ в постійний струм. Чутливість кількісно визначається виразом [52]

$$S_{[\text{дБм}]} = 10 \lg \frac{P_{\min}}{1 \text{ мВт}}, \quad (4)$$

де P_{\min} – мінімальна потужність, необхідна системі для виконання завдання щодо перетворення ЕМВ в постійний струм.

Результатом роботи системи збору ЕМЕ є живлення кінцевих пристроїв постійним струмом. Тому вихідна потужність постійного струму є ще одним показником для оцінки ефективності системи збору ЕМЕ.

4. Математична модель системи БПЕ

У [100 – 106] розроблена нелінійна математична модель (ММ) електродинамічного рівня системи БПЕ, яка використовує поєднання електродинамічного і схемотехнічного підходів та використовує поняття змінних стану. Автори [100 – 106] зазначають, що нелінійна ММ електродинамічного рівня системи БПЕ, на відміну від існуючих, відкриває нові широкі можливості щодо розвитку методів аналізу та оптимізації систем БПЕ з наступних причин:

- є універсальною, тому що дозволяє проводити аналіз і оптимізацію систем БПЕ, в яких використовуються різні технології передачі енергії;

- дозволяє врахувати всю сукупність нелінійних ефектів, які виникають в системах БПЕ через наявність в їх складі антен та трактів живлення з нелійними характеристиками (передавальні активні фазовані антенні решітки, паразитні нелінійності в передавальних антенах, ректени);

- враховує взаємні зв'язки в самій системі БПЕ (внутрішньо системні процеси [102], а також її електродинамічну взаємодію з іншими РЕС і взаємодію інших РЕС з нею (міжсистемна взаємодія [101], що дозволяє коректно вирішувати задачі електромагнітної сумісності ще на етапі моделювання систем БПЕ, а також вирішувати задачі щодо проєктування РЕС нових класів з одночасною передачею інформації та енергії;

- є гнучкою, тому що при аналізі передбачає можливість зміни конфігурації системи БПЕ в залежності від її призначення (технології передачі енергії) і можливість проведення аналізу окремих її підсистем, пристроїв, вузлів.

Дана ММ ґрунтується на моделі антен з нелійними елементами (АНЕ), що складається з лінійних (ЛБ) та нелінійних (НБ) багатопольосників. У [100] сформульовано етапи побудови нелінійної ММ електродинамічного рівня системи БПЕ. Розглядалася система БПЕ, в якій передавальна та приймальна підсистеми мають довільні конфігурації (рис. 4) і до складу яких входять антени та тракти їх живлення з НЕ. Зазначено, що в передавальній (T) та приймальній (R) підсистемах системи БПЕ можна виділити нелінійні підсхеми (НПС), лінійні підсхеми (ЛПС), випромінювальні структури (ВС), генератори та навантаження. Показано, що систему БПЕ довільної конфігурації можна уявити як АНЕ. Для цього нелінійні підсхеми передавальної підсистеми НПС $_T$ і приймальної підсистеми НПС $_R$ було об'єднано в нелінійну підсхему НПС $_{TR}$, яку названо нелінійною підсхемою системи БПЕ (рис. 12). Лінійні підсхеми передавальної підсистеми ЛПС $_T$ і приймальної підсистеми ЛПС $_R$ об'єднано в лінійну підсхему ЛПС $_{TR}$ системи БПЕ. Випромінювальну структуру передавальної підсистеми ВС $_T$ і ректени ВС $_R$ об'єднано в підсхему ВС $_{TR}$ – випромінювальну структуру системи БПЕ, а джерела (генератори) і навантаження в підсхему, яку названо зовнішні пристрої (ЗП $_{TR}$) системи БПЕ. Кожній підсхемі у відповідність були поставлені ЛБ та НБ. Для більш повного опису системи БПЕ з погляду її електродинамічної взаємодії з іншими РЕС (міжсистемна взаємодія) на рис. 12 виділені додаткові групи входів (перетини $\delta'_T - \delta'_T$ й $\delta'_R - \delta'_R$), по яких і враховується ця міжсистемна взаємодія.

Символом $\wedge \vee$ відзначена та обставина, що при об'єднанні в один багатополіусник BC_T і BC_R та розсіювачів взаємний зв'язок між ними враховується в параметрах (компонентних рівняннях) об'єднаного багатополіусника BC_{TR} .

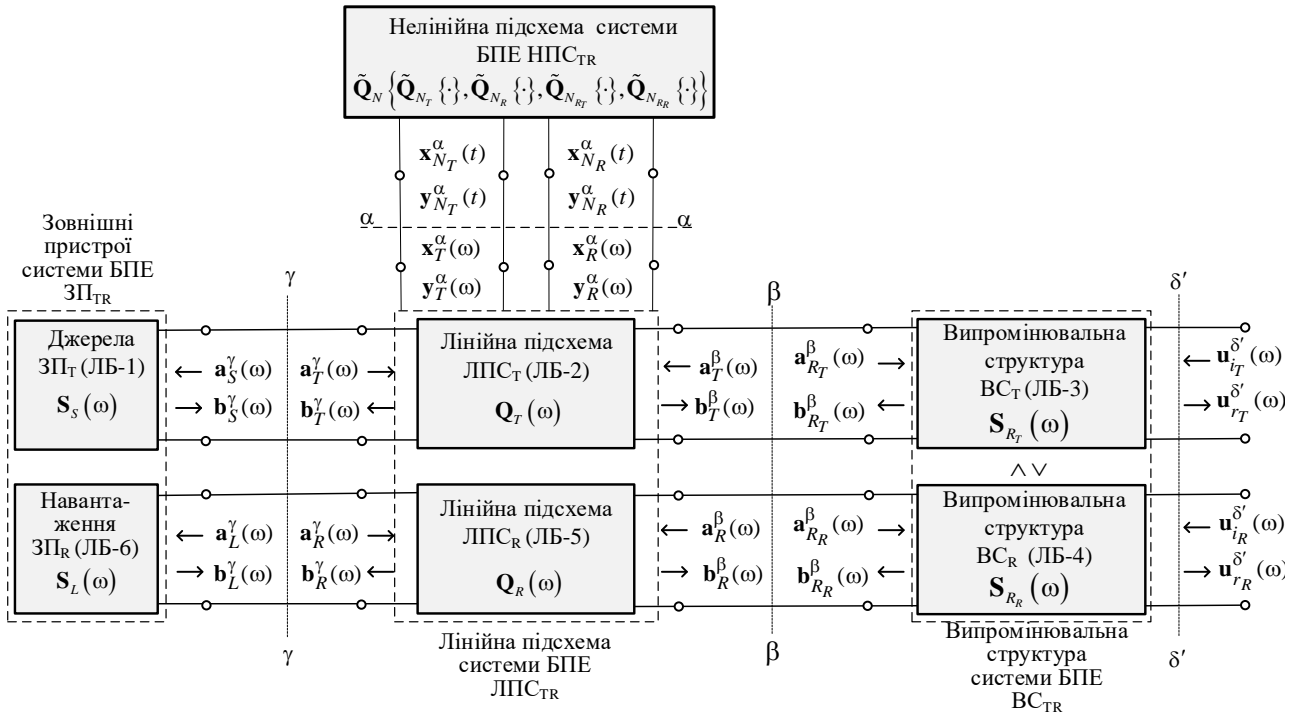


Рис. 12. Структурна схема системи БПЕ

У [100] обґрунтовано, що з метою створення узагальненої моделі системи БПЕ режими входів НБ доцільно описувати в часовій області як векторами струмів $\mathbf{i}_{N^{**}}^\alpha(t)$ і напруг $\mathbf{u}_{N^{**}}^\alpha(t)$, так і векторами падаючих $\mathbf{a}_{N^{**}}^\alpha(t)$ та відбитих $\mathbf{b}_{N^{**}}^\alpha(t)$ хвиль. Тому до розгляду введені узагальнені вектори (рис. 12 перетин $\alpha - \alpha$):

$$\mathbf{x}_{N^{**}}^\alpha(t) = \left[\mathbf{u}_{N^{**}}^{\alpha 1}(t) \quad \mathbf{i}_{N^{**}}^{\alpha 2}(t) \quad \mathbf{a}_{N^{**}}^{\alpha 3}(t) \right]^T, \quad \mathbf{x}_{N^{**}}^\alpha(t) = \left[\mathbf{u}_{N^{**}}^{\alpha 1}(t) \quad \mathbf{i}_{N^{**}}^{\alpha 2}(t) \quad \mathbf{a}_{N^{**}}^{\alpha 3}(t) \right]^T,$$

де верхній індекс T – операція транспонування; $\mathbf{u}_{N^{**}}^{\alpha 1}(t), \mathbf{i}_{N^{**}}^{\alpha 2}(t), \mathbf{a}_{N^{**}}^{\alpha 3}(t)$ – вектори входних впливів на відповідних входах НБ; $\mathbf{i}_{N^{**}}^{\alpha 1}(t), \mathbf{u}_{N^{**}}^{\alpha 2}(t), \mathbf{b}_{N^{**}}^{\alpha 3}(t)$ – вектори відгуків на відповідних входах НБ; $**$ відповідає передавальній підсистемі T або приймальній R .

Враховуючи сказане та умови з'єднання в перетинах $\beta - \beta$ і $\gamma - \gamma$ систему БПЕ було подано у вигляді багатовходової АНЕ (рис. 13).

Нелінійна підсхема НПС_{TR} системи БПЕ описується в часовій області нелінійним діагональним матричним оператором

$$\tilde{Q}_N \{\cdot\} = \text{diag} \left\{ \tilde{Q}_{N_T} \{\cdot\}, \tilde{Q}_{N_R} \{\cdot\} \right\}.$$

Блоки матриці $\tilde{Q}_N \{\cdot\}$ мають наступну структуру:

$$\tilde{Q}_{N^{**}} \{\cdot\} = \text{diag} \left\{ \tilde{G}_{N^{**}} \{\cdot\}, \tilde{R}_{N^{**}} \{\cdot\}, \tilde{S}_{N^{**}} \{\cdot\} \right\},$$

де $**$ відповідає T або R ; $\text{diag} \{\cdot\}$ – діагональна матриця, $\tilde{G}_N \{\cdot\}, \tilde{R}_N \{\cdot\}, \tilde{S}_N \{\cdot\}$ – нелінійні оператори, що задають зв'язок між входними впливами (відповідно напругами, струмами,

падаючими хвилями) і відгуками (струмами, напругами, відбитими хвилями, відповідно) на входах НБ (НПС_{TR})

Зовнішні параметри НПС_{TR} пов'язані системою компонентних рівнянь:

$$\mathbf{y}_N^\alpha(t) = \tilde{\mathbf{Q}}_N \{ \mathbf{x}_N^\alpha(t) \}. \quad (5)$$

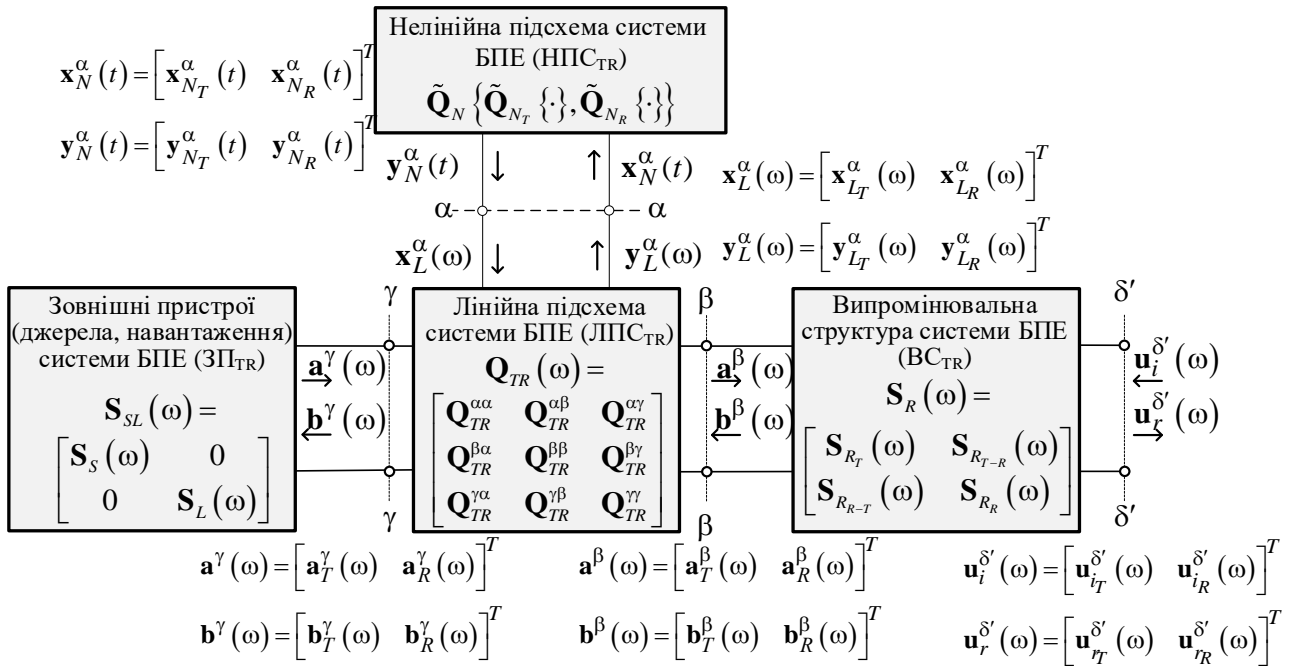


Рис. 13. Подання системи БПЕ у вигляді багатовходової АНЕ

Багатополіусник зовнішніх пристроїв системи БПЕ ЗП_{TR} характеризується блоковою матрицею розсіяння $\mathbf{S}_{SL}(\omega)$ (рис. 13). Багатополіусник ЛПС_{TR} зручно описувати блоковою змішаною матрицею $\mathbf{Q}_{TR}(\omega)$, тому що режими входів багатополіусника ЛПС_{TR}, який з'єднується, відповідно, із багатополіусниками ЗП_{TR}, ВС_{TR} і нелінійним багатополіусником НПС_{TR} (рис. 13), доцільно характеризувати векторами, аналогічними тим, які характеризують режими відповідних входів приєднаних до нього багатополіусників. Багатополіусник ВС_{TR} описується блоковою матрицею розсіяння $\mathbf{S}_R(\omega)$ (рис. 13), яка пов'язує падаючі та відбиті хвилі в перерізі $\beta-\beta$ (внутрішньосистемна взаємодія) й амплітуди збіжних та розбіжних хвиль у каналах вільного простору в перерізі $\delta'-\delta'$. Вектори $\mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega)$ та $\mathbf{u}_r^{\delta'}(\omega)^T$ є комплексними амплітудами сферичних взаємоортогональних типів хвиль, за допомогою яких досліджувана система БПЕ взаємодіє з іншими системами (міжсистемна взаємодія).

У [100] розглянуто виведення рівнянь стану та вихідних рівнянь системи БПЕ. Зазначається, що найдоцільніше вектором змінних стану вибрати один з векторів, які описують режими входів ЛПС_{TR}, з'єднаних з НПС_{TR}, тобто або вектор $\mathbf{x}_L^\alpha(\omega)$, або вектор $\mathbf{y}_L^\alpha(\omega)$. З точки зору аналізу системи БПЕ вибір $\mathbf{x}_L^\alpha(\omega)$ або $\mathbf{y}_L^\alpha(\omega)$, як вектора змінних стану, є цілком рівноправним, тому що і той, і другий вектори, по-перше, однозначно визначають режим входів у перерізі $\alpha-\alpha$, і, по-друге, знаючи один з цих векторів, можна визначити режим усієї системи БПЕ, тобто режими у перерізах $\beta-\beta$, $\gamma-\gamma$, $\delta-\delta$ (рис. 13). При такому виборі змінних стану на етапі складання рівнянь стану всю лінійну підсхему системи БПЕ досить описати лише відносно перерізів $\alpha-\alpha$.

Далі з врахуванням (5) та умов з'єднання у перетині $\alpha-\alpha$ отримано рівняння стану системи БПЕ в часовій області:

$$\mathbf{y}_L^\alpha(t) = \tilde{\mathbf{Q}}_N \{ \mathbf{x}_L^\alpha(t) \} \text{ або } \mathbf{x}_L^\alpha(t) = \tilde{\mathbf{Q}}_N^{-1} \{ \mathbf{y}_L^\alpha(t) \}, \quad (6)$$

де

$$\tilde{\mathbf{Q}}_N \{ \cdot \} = \text{diag} \{ \tilde{\mathbf{Q}}_{N_T} \{ \cdot \}, \tilde{\mathbf{Q}}_{N_R} \{ \cdot \} \}, \quad \tilde{\mathbf{Q}}_{N_T} \{ \cdot \} = \text{diag} \{ -\tilde{\mathbf{G}}_{N_T} \{ \cdot \}, \tilde{\mathbf{R}}_{N_T} \{ -\mathbf{E} \cdot \}, \tilde{\mathbf{S}}_{N_T} \{ \cdot \} \},$$

$$\tilde{\mathbf{Q}}_{N_R} \{ \cdot \} = \text{diag} \{ -\tilde{\mathbf{G}}_{N_R} \{ \cdot \}, \tilde{\mathbf{R}}_{N_R} \{ -\mathbf{E} \cdot \}, \tilde{\mathbf{S}}_{N_R} \{ \cdot \} \}.$$

З розв'язку рівняння стану визначається вектор $\mathbf{x}_L^\alpha(t)$. Надалі розглядається тільки періодичний або квазіперіодичний сталий режим роботи систем БПЕ. Відповідно встановлюється зв'язок між векторами $\mathbf{x}_L^\alpha(t)$ та $\mathbf{x}_L^\alpha(\omega)$, $\mathbf{y}_L^\alpha(t)$ та $\mathbf{y}_L^\alpha(\omega)$.

В ході одержання рівнянь стану (6) жодних обмежень (окрім режиму збудження) не вводилося. Тому отримані рівняння стану дають можливість описати притаманні системам БПЕ нелінійні ефекти, зв'язані з утворенням у їх відгуку нових спектральних складових із частотами $\nu_n \neq \omega_k$ ($k = \overline{0, q}$), відмінними від частот вхідних впливів ω_k , а також нелінійну залежність вектора змінних стану $\mathbf{x}(\omega)$ від рівня вхідних впливів.

Система вихідних рівнянь системи БПЕ [100]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{b}^\gamma(\nu_n) \\ \mathbf{u}_r^{\delta'}(\nu_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\alpha}(\nu_n) & \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\gamma}(\nu_n) & \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\delta'}(\nu_n) \\ \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\alpha}(\nu_n) & \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\gamma}(\nu_n) & \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\delta'}(\nu_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_L^\alpha(\nu_n) \\ \mathbf{a}^\gamma(\omega_k) \\ \mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega_k) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Знаючи вектор вхідних параметрів системи БПЕ, можна визначити всі її зовнішні параметри, що описують міжсистемну взаємодію та внутрішньосистемні процеси [103, 104]. Фізичний зміст блоків матриці розсіяння випромінювальної структури системи БПЕ та співвідношення, що дозволяють розрахувати всі блоки матриці розсіяння, які необхідні при складанні і розв'язанні рівнянь стану системи БПЕ, а також визначені її зовнішніх характеристик, наведено у [101, 102].

5. Експериментальна перевірка адекватності запропонованої моделі

Для перевірки адекватності запропонованої моделі у [100 – 104] та методики аналізу систем БПЕ було проведено розрахунок за розробленою моделлю і порівняння з експериментальними результатами, які отримані різними авторами для простих систем БПЕ. Розглядається тільки передача енергії в ближній зоні, так як даний випадок дозволяє, з

одного боку, підтвердити достовірність ММ [100 – 104] і, з іншого – показати її універсальність.

Як перший приклад розглянуто передачу енергії між двома малими кільцевими антенами та проведено порівняння з експериментальними результатами [107]. Схема експерименту показана на рис. 14. Автори цієї роботи досліджували коефіцієнт передачі за потужністю

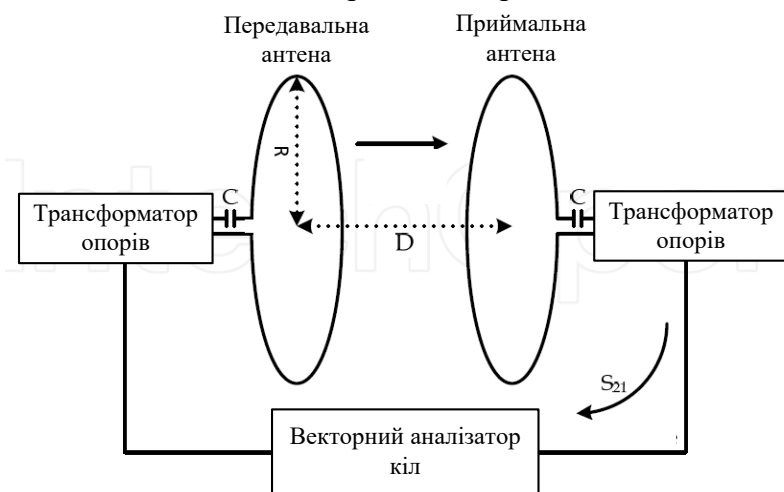


Рис. 14. Схема експерименту з вимірювання коефіцієнта передачі системи БПЕ [107]

$$k_P = \frac{P_L}{P_{in}} = |S_{21}|^2 \text{ між передавальною та приймальною антенами, розташованими в ближній зоні.}$$

Передавальна та приймальна антени налаштовувалися в резонанс на одній і тій же частоті. Особливістю даної моделі системи БПЕ є те, що автори використовували два випромінювачі з узгоджувальними пристроями замість узгодження за допомогою додаткових розсіювачів, що входять до складу системи. Перевагою використовуваної системи є можливість виключення індуктивностей з магнітним зв'язком, що призводить до спрощення системи. Кожна з цих антен має один виток радіусом 150 мм і підключені послідовно ємності для настроювання на необхідну резонансну частоту. Експеримент було проведено для відстаней між двома антенами відповідно 49, 80, 170 й 357 мм. Передбачалося, що середня робоча частота системи $f_0 \approx 13.5$ МГц ($\lambda_0 \approx 22.2$ м). Таким чином, антени мали радіус $0.0067\lambda_0$, а відстані між ними становили – $0.002\lambda_0$, $0.0036\lambda_0$, $0.0077\lambda_0$ й $0.016\lambda_0$. На рис. 14 наведено отримані за запропонованою моделлю частотні залежності коефіцієнта передачі за потужністю даної системи БПЕ при різних відстанях між приймальною і передавальною антенами та результати експериментальних вимірювань з [107].

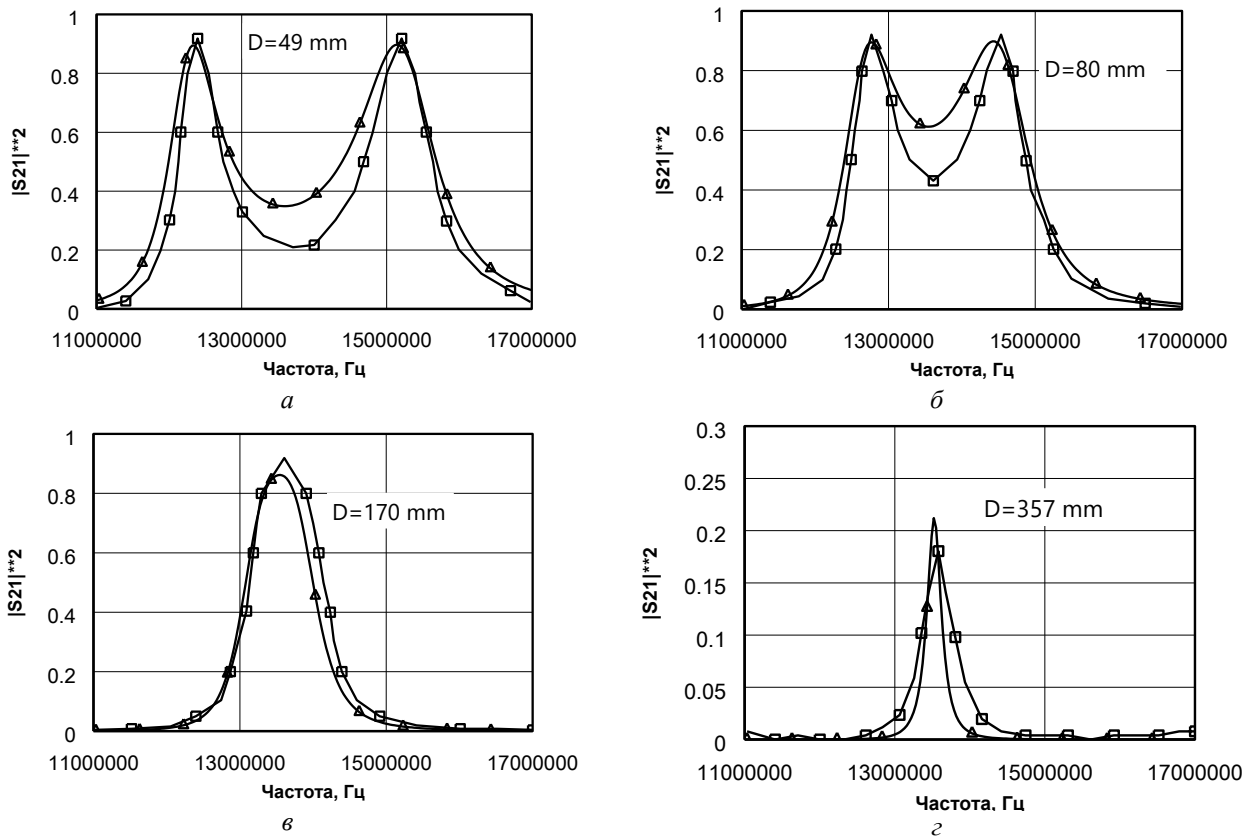


Рис. 15. Частотні залежності коефіцієнта передачі за потужністю системи БПЕ при різних відстанях між приймальною і передавальною антенами (-Δ- –результати моделювання, -□- – експериментальні значення [107])

Як видно з рис. 15, при відстані між антенами 49 мм система має найбільший коефіцієнт передачі за потужністю на двох частотах, приблизно на 12.4 і 15.2 МГц. При зменшенні відстані а, отже, зв'язку між антенами, різниця резонансних частот зменшується і вони приблизно рівні 12.7 та 14.6 МГц (рис. 15, б), відповідно. При відстанях більше 170 мм поділ резонансних частот зникає (рис. 15, в, з), і система має одну резонансну частоту приблизно 13.6 МГц, а ефективність системи значно знижується зі збільшенням відстані. Порівняння графіків на рис. 15, а–г показує досить гарний збіг результатів моделювання та експерименту.

Як другий приклад було використано результати експериментальних вимірювань параметрів розсіювання системи БПЕ, показаної на рис. 16 [108]. При виготовленні експериментального макета використано мідні провідники і керамічні конденсатори ємністю

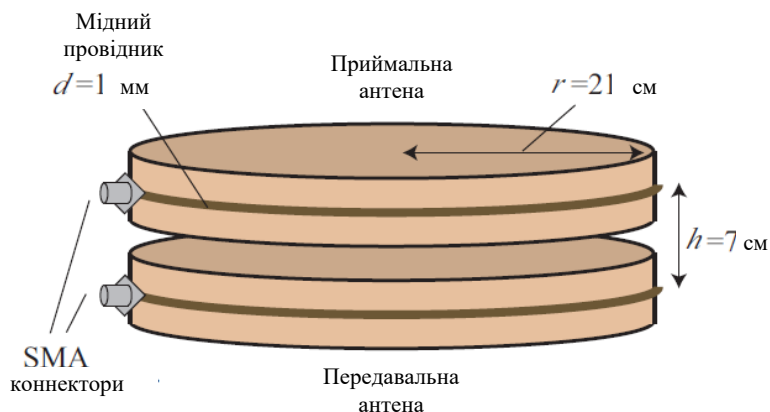


Рис. 16. Ескіз експериментального макета для вимірювання S-параметрів системи БПЕ [108]

100 пФ для настроювання випромінювачів в резонанс. Вимірювання S-параметрів проводилося за схемою, показаної на рис. 14, однак без використання трансформаторів опорів. Експериментальні результати з [108] показано на рис. 17. На цих рисунках показані також S-параметри, отримані в результаті моделювання. За даними авторів провідність матеріалу випромінювачів становила $6.8 \cdot 10^7$ См/м. Таке значення

використано при моделюванні випромінювачів, що мають кінцеву провідність. Як видно з рис. 17,а наявність втрат в провідниках випромінювачів істотно знижує коефіцієнт передачі системи, а рис. 17,б демонструє досить гарний збіг теоретичних та експериментальних результатів.

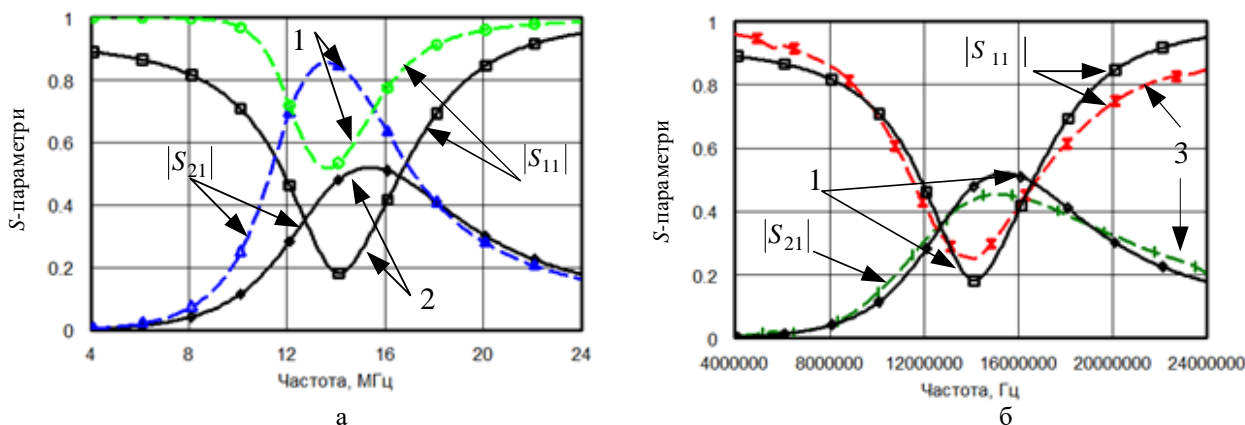


Рис. 17. Параметри розсіювання системи БПЕ, показаної на рис. 16: а – результати моделювання для випромінювачів, виконаних з ідеальних провідників (криві 1) та матеріалу з кінцевою провідністю (криві 2); б – порівняння результатів моделювання (криві 1) з результатами експерименту (криві 3) [108]

Ще одним із прикладів для порівняння було обрано систему БПЕ, фотографія якої запозичена з [109] та показана на рис. 18. Ця система БПЕ складається з двох випромінювачів (передавального і приймального) та трьох розсіювачів. Випромінювачі та розсіювачі за допомогою ємностей налаштувалися в резонанс на частоту близько 70 МГц. Радіус випромінювачів і розсіювачів становив 37 мм, значення резонансних ємностей 33 пФ, відстань між елементами 70 мм, а опори джерела і навантаження 50 Ом. На рис. 19 наведено частотні залежності коефіцієнта передачі системи, що отримані за запропованою моделлю (крива 1), експериментальні результати з роботи [109] (крива 2) і результати розрахунку по моделі, запропованої в цій же роботі (крива 3).

Як видно з порівняння, результати розрахунку за запропованою моделлю набагато краще збігаються з експериментальними результатами, ніж результати моделювання, отримані авторами [109]. Таким чином, наведені в цьому підрозділі результати свідчать про достовірність моделі, запропованої в даній роботі, адекватність отриманих з її допомогою результатів і її універсальність.

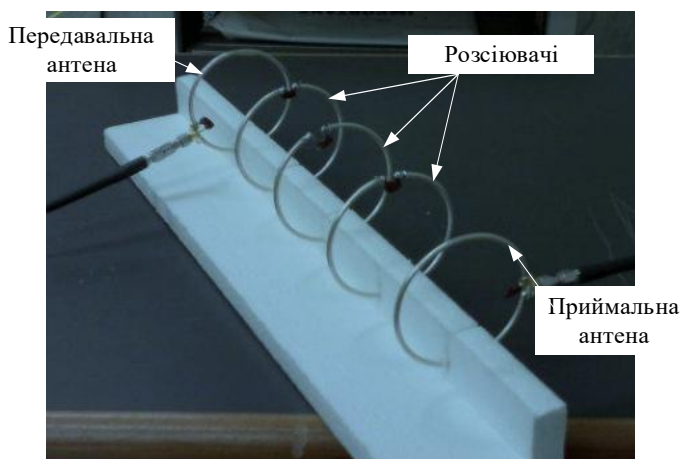


Рис. 18. Фотографія експериментального макета системи БПЕ [109]

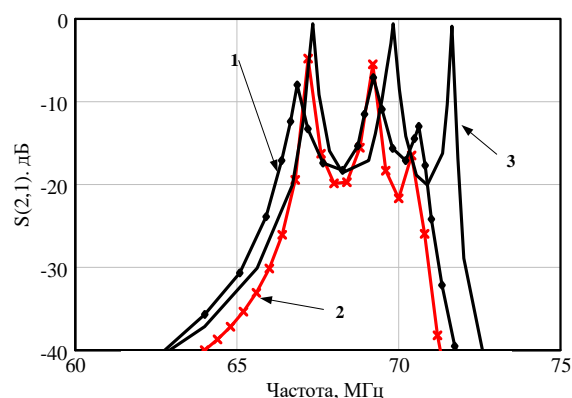


Рис. 19. Частотні залежності коефіцієнта передачі системи БПЕ, що наведена на рис. 18

Висновки

Останнім часом все більша увага приділяється напрямку науки і техніки, пов'язаному з розробкою інноваційних технологій створення нових високоефективних систем БПЕ. Видно, що до теперішнього часу в галузі БПЕ зроблено чимало, підсилюється її вплив на процес розвитку світової енергетики та технічний рівень розробок у цій галузії досить високий. Проте, незважаючи на значні досягнення в галузі БПЕ, все ще багато питань перебувають у стадії досліджень, причому це стосується не тільки окремих підсистем, але й усієї системи БПЕ в цілому, що функціонує в умовах реальної електромагнітної обстановки. Одні з цих питань були вже вирішені колективом лабораторії антен ХНУРЕ. Було показано, що для аналізу та оптимізації систем БПЕ, в яких використовуються принципово різні технології безпроводної передачі енергії, можна застосувати підхід, в основі якого лежить єдине уявлення, на електродинамічному рівні, про функціонування систем БПЕ широкого класу й призначення. У даній роботі були продовжені дослідження, започатковані колективом лабораторії антен ХНУРЕ щодо створення ММ системи БПЕ. А саме – доведено адекватність розробленої нелінійної ММ електродинамічного рівня системи БПЕ шляхом порівняння результатів розрахунків щодо розробленої моделі з відомими експериментальними даними. Показано, що розроблена колективом ХНУРЕ нелінійна ММ електродинамічного рівня системи БПЕ є адекватна та дозволяє проводити суворий аналіз та оптимізацію як систем БПЕ широкого класу й призначення в цілому, так і окремих їх підсистем, функціональних блоків та вузлів.

Список літератури:

1. Shinohara N. *Wireless Power Transfer via Radiowaves*. John Wiley & Sons. 2014. 238 p.
2. Nikolettseas S., Yang Y., Georgiadis A. *Wireless Power Transfer Algorithms, Technologies and Applications in Ad Hoc Communication Networks*. Springer Nature Switzerland AG. 2016. 745 p.
3. Lu X., Wang P., Niyato D., Kim D.I., Han Z. *Wireless charging technologies: Fundamentals, standards, and network applications* // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2015. vol. 18, no. 2. P. 1413 – 1452.
4. Sun T., Xie X., Wang Z. *Wireless power transfer for medical microsystems*. Springer. 2013.
5. Сазонов Д.М. *Антенны и устройства СВЧ*. Москва : Высш. шк., 1988. 432 с.
6. Грецьких Д.В., Гомозов А.В., Цикаловский Н.М., Аль-Самарай Ш.Ф.А. *Области применения и современные тенденции развития наноректенн* // *Технология приборостроения*. 2012. №2. С. 36 – 42.
7. Дьячков П.Н. *Электронные свойства и применения нанотрубок*. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. 488 с.
8. Слепях Г.Я., Максименко С.А., Кужир П.П. *Современные тенденции развития наноэлектромагнетизма: аналитический обзор [Электронный ресурс]* // НИУ «Ин-т ядерных проблем» БГУ. 2012. Режим доступа: http://elib.bsu.by/bitstream/123456789/18999/1/fanem_2012.pdf.
9. Novotny L., N. van Hulst. *Antennas for Light* // *Nat. Photon*. 2011. N 5. P. 83 – 90.
10. Zhu Z. *Optical rectenna solar cells using graphene geometric diodes* / Z. Zhu, S. Grover, K. Krueger, G. Moddel // *37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 2011. P. 20 – 22.

11. Joshi S. Infrared Optical Response of Geometric Diode Rectenna Solar Cells / S.Joshi, Z. Zhu, S. Grover, G. Moddel // 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2012. P. 2976 – 2978.
12. Kotter D.K., Novack S.D., Slafer W.D., Pinhero P.J. Theory and manufacturing processes of solar nanoantenna electromagnetic collectors // Journal of Solar Energy Engineering-transactions of The Asme. 2010. Vol. 132, N 1. P. 1 – 10.
13. Pan Y., Rosamond M.C., McDonald A. at al. Design and performance of micro-rectenna arrays for thermal energy harvesting // 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). 2015. P. 1 – 2.
14. Qassim Abdullahi S., Rahil Joshi, Symon K. Podilchak, Sadeque R. Khan, at al. Design of a wireless power transfer system for assisted living applications // Desmulliez and Apostolos Georgiadis Wireless Power Transfer. 2019. Vol. 6, Is. 1. P. 41 – 56.
15. Mickel Budhia, Grant A. Covic, John T. Boys. Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems // IEEE Transactions on Power Electronics. 2011. Vol. 26, Is. 11. P. 3096 – 3108.
16. Taylor M. Fisher, Kathleen Blair Farley, Yabiao Gao, Hua Bai and Zion Tsz Ho Tse. Electric vehicle wireless charging technology: a state-of-the-art review of magnetic coupling systems // Wireless Power Transfer. 2014. Vol. 1, Is. 02. P 87 – 96.
17. Hassler M., Atasoy O., Twelker K., Kesler M., Birkendahl J. and Krammer J. A comparison on simulated, analytic, and measured impedance values for an inductive power transfer system // Wireless Power Transfer. 2020. Vol. 7, Is. 1. P. 51 – 59.
18. Poguntke T., Schumann P., Ochs K. Radar-based living object protection for inductive charging of electric vehicles using two-dimensional signal processing // Wireless Power Transfer. 2017. Vol. 4, Spec. Is. 2: Contactless Charging for Electric Vehicles. P. 88–97.
19. Zhang Z., Zhang B., Deng B., Wei X. and Wang J. Opportunities and challenges of metamaterial-based wireless power transfer for electric vehicles // Wireless Power Transfer. 2018. Vol. 5(1). P. 9 – 19.
20. Jing Zhou, Kan Guo, Zhonghua Chen, Hui Sun and Sideng Hu. Design considerations for contact-less underwater power delivery: a systematic review and critical analysis // Wireless Power Transfer. 2020. Vol. 7, Is. 1. P. 76 – 85.
21. Wang X., Liu Z., Zhang T. Flexible sensing electronics for wearable/attachable health monitoring // Small. 2017. Vol. 13(25). P. 1 – 19.
22. Curry E.J., Ke K., Chorsi M.T., Wrobel K.S., at al. Biodegradable piezoelectric force sensor // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2018, Vol. 115. P. 909 – 914.
23. Devansh R. Agrawal, Yuji Tanabe, Desen Weng, Andrew Ma, at al. Conformal phased surfaces for wireless powering of bioelectronic microdevices // Nature Biomedical Engineering. 2017. Vol. 1, Article number: 0043. P. 1 – 9.
24. Mustafa F. Mahmood, Saleem Lateef Mohammed, Sadik Kamel Gharghan, Ali Al-Naji, and Javaan Chahl. Hybrid Coils-Based Wireless Power Transfer for Intelligent Sensors // Sensors. 2020. Vol. 20(9). P. 1 – 24.
25. Monti G., Arcuti P., Tarricone L. Resonant Inductive Link for Remote Powering of Pacemakers // IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques. 2015. Vol. 63, No. 11. P. 3814 – 3822.
26. Moore J., Castellanos S., Xu S., Wood B., at al. Applications of Wireless Power Transfer in Medicine: State-of-the-Art Reviews // Annals of Biomedical Engineering. 2019. Vol. 47, No. 1. P. 22 – 38.
27. Xiong Q. Wireless Charging Device for Artificial Cardiac Pacemaker / Quan Xiong // International Conference on Information Technology and Management Innovation (ICITMI). 2015. P. 765–768.
28. Brown W.C. Experimental involving a microwave beam to power and position a helicopter // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1969. Vol. AES-5, Is. 5. P. 692 – 702.
29. Brown W.C. Adapting Microwave Techniques to Help Solve Future Energy Problems //G MTT International Microwave Symposium Digest of Technical Papers. 1973. Vol. 73.1. P. 189 – 191.
30. Brown W.C., Eves E.E. Microwave power transmission and its application to space // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1992. Vol. 40, No 8. P. 1239 – 1250.
31. Yang Y., Zhang Y., Duan B., at al. A novel design project for space solar power station (SSPS-OMEGA) // Acta Astronautica. 2016. Vol. 121. P. 51 – 58.
32. Glaser P.E. An overview of the solar power satellite option // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1992. Vol. 40, Is. 6. P. 1230 – 1238.
33. Shinohara N. Power without wires // IEEE Microwave Magazine. 2011. V.12, No 7. P. 64 – 73.
34. Shoki H. Issues and Initiatives for Practical Use of Wireless Power Transmission Technologies in Japan // Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS), IEEE MTT-S International. 2011. P. 87 – 90.
35. Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности // Труды Междунар. форума «Возобновляемая энергетика. Пути повышения энергетической и экономической эффективности REENFOR – 2014» ; под. ред. О.С. Попеля, Д.О. Дуникова. Москва : ОИВТ РАН, 2014. 478 с.
36. Гомозов А.В., Гомозов В.И., Шокало В.М., Грецких Д.В., Аль-Самарай Ш.Ф.А. Передающая подсистема беспроводной передачи энергии к труднодоступным объектам на основе многопозиционной системы излучателей с фокусировкой излучения. Ч. 1 // Радиотехника. 2011. №165. С. 112 – 118.

37. Гомозов А.В., Гомозов В.И., Шокало В.М., Грецких Д.В., Аль-Самарай Ш.Ф.А. Передающая подсистема беспроводной передачи энергии к труднодоступным объектам на основе многопозиционной системы излучателей с фокусировкой излучения. Ч. 2 // Радиотехника. 2011. №167. С. 18 – 24.
38. Gomozov A.V., Shokalo V.M., Gretsikh D.V., Al-Sammarrai Sh.F.A. Principles of construction and application of microwave systems for wireless energy transmission of ground and space basing // Computational problems of electrical engineering. 2012. Vol. 2, № 1. P. 15 – 23.
39. Shimokura N., Kaya N., Shinohara M., Matsumo H. Point-to-point microwave power transmission experiment // Scripta Technica, Inc. Electr Eng Jpn. 1997. No 120(1). P. 33 – 39.
40. Applications of wireless power transmission via radio frequency beam / Report ITU-R SM.2392-0. 2016. 33 p.
41. MHI Successfully Completes Ground Demonstration Testing of Wireless Power Transmission Technology for SSPS – Expanding the Potential for New Industrial Applications [Электронный ресурс] // Press information. 2015. Режим доступа до ресурсу: <http://www.mhi-global.com/news/story/1503121879.html>.
42. East T. A self-steering array for the SHARP microwave-powered aircraft // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1992. Vol. 40, No 12. P. 1565 – 1567.
43. Sohlesak J.J., Alden A., Ohno T. SHARP (Stationary high altitude platform): rectenna and low altitude tests // Globecom 85: IEEE Glob. Telecommun. conf. New Orleans. 1985. Vol. 2. P. 960 – 964.
44. Fujino Y., Fujita M., Kaya N., et al. A Dual Polarization Microwave Power Transmission System for Microwave Propelled Airship Experiment // ISAP'96 Proceedings, Chiba, Japan. 1996. P. 393 – 396.
45. Fujino Y., Fujita M. Development of a High-Efficiency Rectenna for Wireless Power Transmission – Application to Microwave-Powered Airship Experiment // J. Commun. Res. Lab. 1999. Vol. 43, No 3. P. 367 – 37.
46. Gavan J., Tapuchi S. Microwave wireless-power transmission to high-altitude-platform systems // URSI Radio Science Bulletin. 2010. Vol. 2010, No 334. P. 25 – 42.
47. Dickinson R.M. Power in the sky: Requirements for microwave wireless power beamers for powering high-altitude platforms // IEEE Microwave Magazine. 2013. Vol. 14, Is. 2. P. 36 – 47.
48. Yuichiro O., Naohiro T. Study of Electric Aircraft Charged by Beamed Microwave Power // IHI Engineering Review. 2015. Vol. 48, No 2. P. 29 – 32.
49. Shimamura K., Sawahara H., Oda A., et al. Feasibility study of microwave wireless powered flight for micro air vehicles // Wireless Power Transfer. 2017. Vol. 4, No 2. P. 146 – 159.
50. Takabayashi N., Shinohara N., Mitani T., Furukawa M., Fujiwara T. Rectification Improvement With Flat-Topped Beams on 2.45-GHz Rectenna Arrays // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2020. Vol. 68, Is. 3. P. 1151 – 1163.
51. Гомозов А.В., Грецких Д.В., Цикаловский Н.М., Шарапова Е.В. Радиотехническая система беспроводного энергоснабжения беспилотных летательных аппаратов // Космическая техника. Ракетное вооружение. Сб. науч.-техн. ст. ГП" КБ Южное". 2015. №1 (108). С. 36 – 41.
52. Sherazi H.H.R., Zorbas D., O'Flynn B. A Comprehensive Survey on RF Energy Harvesting: Applications and Performance Determinants // Sensors. 2022, Vol. 22, No. 2990. P. 1 – 36.
53. Грецких Д.В., Лихограй В.Г., Щербина А.А., Сакало С.Н., Ткачева Т.С. Система контроля подвески автомобиля на основе технологий беспроводной передачи энергии // Радиотехника. 2020. Вып. 201. С. 52 – 63.
54. Gretsikh D., Luchaninov A., Lykhograi V., Shcherbina A., Sakalo S. Researching the possibility of wireless energy transmission for the power supply condition monitoring system of a car's suspension // IEEE Ukrainian Microwave Week. 2020. P. 105 – 109.
55. Powercast Corporation. TX91501b Powercaster® Transmitter. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.powercastco.com/products/powercaster-transmitter> (4 січня 2021).
56. Powercast Corporation. Powercaster® Powerspot. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.powercastco.com/products/powersp> (4 січня 2021).
57. Ossia. Ossia's Cota: Real Wireless Power. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.ossia.com/cota> (4 січня 2021).
58. Ren J., Hu J., Zhang D., Guo H., Zhang Y., Shen X. RF energy harvesting and transfer in cognitive radio sensor networks: Opportunities and challenges // IEEE Commun. Mag. 2018. Vol. 56. P. 104 – 110.
59. Stoopman M., Keyrouz S., Visser H., Philips K., Serdijn W. A self-calibrating RF energy harvester generating 1V at 26.3 dBm // Proceedings of the 2013 Symposium on VLSI Circuits, Kyoto, Japan. 2013. P. 226 – 227.
60. Stoopman M., Keyrouz S., Visser H.J., Philips K., Serdijn W.A. Co-design of a CMOS rectifier and small loop antenna for highly sensitive RF energy harvesters // IEEE J. Solid-State Circuits. 2014. Vol. 49. P. 622 – 634.
61. Sample A.P., Parks A.N., Southwood S., Smith J.R. Wireless ambient radio power. In *Wirelessly Powered Sensor Networks and Computational RFID* // Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013. P. 223 – 234.
62. Papotto G., Carrara F., Finocchiaro A., Palmisano G. A 90-nm CMOS 5-Mbps crystal-less RF-powered transceiver for wireless sensor network nodes // IEEE J. Solid-State Circuits. 2013. Vol. 49. P. 335 – 346.
63. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions // Future Gener. Comput. Syst. 2013. Vol. 29. P. 1645 – 1660.
64. Asghari P., Rahmani A.M., Javadi H.H.S. Internet of Things applications: A systematic review // Comput. Netw. 2019. Vol. 148. P. 241 – 261.

65. Choudhary P., Bhargava L., Sing, V., Choudhary M., Kumar Suhag A. A survey–Energy harvesting sources and techniques for internet of things devices // *Mater. Today Proc.* 2020. Vol. 30. P. 52 – 56.
66. Alsharif M.H., Kim S., Kuruo~ glu, N. Energy Harvesting Techniques for Wireless Sensor Networks/Radio-Frequency Identification: A Review // *Symmetry*. 2019. Vol. 11. P. 865.
67. Adila A.S., Husam A., Husi G. Towards the self-powered Internet of Things (IoT) by energy harvesting: Trends and technologies for green IoT // *Proceedings of the 2018 2nd International Symposium on Small-Scale Intelligent Manufacturing Systems (SIMS)*, Cavan, Ireland, 2018. P. 1 – 5.
68. Krupitzer C., Müller S., Lesch V., Züfle M., at al. A Survey on Human Machine Interaction in Industry 4.0. *arXiv* 2020, arXiv:2002.01025.
69. Sherazi H.H.R., Grieco L.A., Imran M.A., Boggia G. Energy-efficient LoRaWAN for Industry 4.0 Applications // *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2020. Vol. 17. P. 891 – 902.
70. Tahir M.A., Ferrer B.R., Luis J., Lastra M. An Approach for Managing Manufacturing Assets through Radio Frequency Energy Harvesting // *Sensors*. 2019. Vol. 19. p. 1 – 21.
71. Tang X., Wang X., Cattley R., Gu F., Ball A.D. Energy harvesting technologies for achieving self-powered wireless sensor networks in machine condition monitoring: A review // *Sensors*. 2018. Vol. 18. P. 1 – 39.
72. Zungeru A.M., Ang L.M., Prabakaran S., Seng K.P. Radio frequency energy harvesting and management for wireless sensor networks. In *Green Mobile Devices and Networks: Energy Optimization and Scavenging Techniques*; Number 13 in 0 // CRC Press: New York, NY, USA. 2012. P. 341 – 368.
73. Visser H.J., Vullers R.J.M. RF Energy Harvesting and Transport for Wireless Sensor Network Applications: Principles and Requirements // *Proc. IEEE*. 2013. Vol. 101. P. 1410 – 1423.
74. Boisseau S., Despesse G. Energy harvesting, wireless sensor networks & opportunities for industrial applications // *EE Times*. 2012.
75. Iyengar A., Kundu A., Pallis G. Healthcare Informatics and Privacy // *IEEE Internet Comput.* 2018. Vol. 22. P. 29 – 31.
76. Yang L., Zhou Y.J., Zhang C., Yang X.M., Yang X.X., Tan C. Compact multiband wireless energy harvesting based battery-free body area networks sensor for mobile healthcare // *IEEE J. Electromagn. Microwaves Med. Biol.* 2018. Vol. 2. P. 109 – 115.
77. Anwar M., Abdullah A.H., Qureshi K.N., Majid A.H. Wireless body area networks for healthcare applications: An overview // *Telkomnika*. 2017. Vol. 15. P. 1088 – 1095.
78. Luo Y., Pu L., Zhao Y. RF Energy Harvesting Sensor Networks for Healthcare of Animals: Opportunities and Challenges // *arXiv* 2018, arXiv:1803.00106.
79. Saraereh O.A., Alsaraira A., Khan I., Choi B.J. A hybrid energy harvesting design for on-body Internet-of-Things (IoT) networks // *Sensors*. 2020. Vol. 20. p. 1 – 17.
80. Haghi M., Thurow K., Stoll R. Wearable devices in medical internet of things: Scientific research and commercially available devices // *Healthc. Inform. Res.* 2017. Vol. 23. P. 4 – 15.
81. Borges L.M., Chávez-Santiago R., Barroca N., Velez F.J., Balasingham I. Radio-frequency energy harvesting for wearable sensors // *Healthc. Technol. Lett.* 2015. Vol. 2. P. 22 – 27.
82. Lin C., Chiu C., Gong J. A Wearable Rectenna to Harvest Low-Power RF Energy for Wireless Healthcare Applications // In *Proceedings of the 2018 11th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics(CISP-BMEI)*, Beijing, China. 2018. P. 1 – 5.
83. Hande A., Bridgelall R., Bhatia D. Energy harvesting for active RF sensors and ID tags. In *Energy Harvesting Technologies* // Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. 2009. P. 459 – 492.
84. Aparicio M.P., Bakkali A., Pelegri-Sebastia J., Sogorb, T., Bou V. Radio frequency energy harvesting-sources and techniques. In *Renewable Energy: Utilisation and System Integration* // Intechopen: London, UK. 2016.
85. Cui L., Zhang Z., Gao N., Meng Z., Li Z. Radio frequency identification and sensing techniques and their applications: A review of the state-of-the-art // *Sensors*. 2019. Vol. 19. p. 1 – 23.
86. Mhatre P., Duche R., Nawale S., Patil P. RF power harvesting system for RFID applications in multiband systems // *Proceedings of the 2015 6th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, Denton, TX, USA. 2015. P. 1 – 5.
87. Olgun U., Chen C., Volakis J.L. Wireless power harvesting with planar rectennas for 2.45 GHz RFIDs // *Proceedings of the 2010 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory*, Berlin, Germany. 2010. P. 329–331.
88. Pellerano S., Alvarado J., Palaskas Y. A mm-Wave Power-Harvesting RFID Tag in 90 nm CMOS // *IEEE J. Solid-State Circuits*. 2010. Vol. 45. P. 1627 – 1637.
89. Bakhtiar A.S., Jalali M.S., Mirabbasi S. An RF power harvesting system with input-tuning for long-range RFID tags // *Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Paris, France. 2010. P. 4085 – 4088.
90. Slesinski R.J. Power Harvesting for Actively Powered RFID Tags and Other Electronic Sensors // *U.S. Patent App.* 12/039,691, 3 September 2009.
91. Sony S., Laventure S., Sadhu A. A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring // *Struct. Control. Health Monit.* 2019. Vol. 26. P. 1 – 22.

92. Srinivasan R., Ali U.H.H. Energy harvesting wireless sensor for achieving self-powered structural health monitoring system // *Circuit World*. 2020. Vol. 46. P. 307 – 315.
93. Loubet G., Takacs A., Gardner E., De Luca A., Udrea F., Dragomirescu D. LoRaWAN Battery-Free Wireless Sensors Network Designed for Structural Health Monitoring in the Construction Domain // *Sensors*. 2019. Vol. 19. P. 1 – 26.
94. Loubet G., Takacs A., Dragomirescu D. Implementation of a battery-free wireless sensor for cyber-physical systems dedicated to structural health monitoring applications // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 24679 – 24690.
95. Sidibe A., Takacs A., Okba A., Aubert H. Design and Characterization of a Compact Rectenna for Structural Health Monitoring Applications // *Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, Atlanta, GA, USA. 2019. P. 1803 – 1804.
96. Cao S., Li J. A survey on ambient energy sources and harvesting methods for structural health monitoring applications // *Adv. Mech. Eng.* 2017. Vol. 9. P. 1 – 14.
97. Шифрин Я.С., Лучанинов А.И., Шокало В.М. Приемно-выпрямительные элементы ректенных систем. Харьков : Харьк. ин-т радиоэлектроники: Деп. в УкрНИИТИ. 31.03.89. № 941–Ук89, 1988. 182 с.
98. Шокало В.М., Лучанинов А.И., Рыбалко А.М., Грецьких Д.В. Крупноапертурные антенны-выпрямители систем беспроводной передачи энергии микроволновым лучом. Харьков : Коллегиум, 2006. 308 с.
99. Шокало В.М., Правда В.І., Усін В.А., Вунтесмері В.С., Грецьких Д.В. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч.2. Випромінювання та поширення електромагнітних хвиль. Харків : Коллегиум, 2010. 435 с.
100. Gretskih D.V. Electrodynamic Model of a Wireless Power Transmission System / D.V. Gretskih, A.I. Luchaninov, J.V. Vishniakova, V.A. Katrich, M.V. Nesterenko // *XXIII International Seminar. Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory*. 2018. P. 80 – 85.
101. Luchaninov A.I. Electrodynamic Approach to Designing WPT Systems with Accounting for Non-system Interactions / A.I. Luchaninov, D.V. Gretskih, A.V. Gomozov, V.A. Katrich, M.V. Nesterenko // *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering*. 2019. P. 80 – 85.
102. Gretskih D. Electrodynamic Approach to Designing Wireless Power Transfer Systems (Internal System Processes) / D. Gretskih, A. Luchaninov, V. Katrich, M. Nesterenko // *IV International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics*. 2019. P. 1 – 6.
103. Gretskih D. External Parameters of Wireless Power Transmission Systems / D. Gretskih, A. Luchaninov, A. Gomozov, V. Katrich, M. Nesterenko // *XXIV International Seminar. Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory*. 2019. P. 117 – 121.
104. Грецьких Д.В., Лихограй В.Г., Щербина А.А., Гомозов А.В. Внешние параметры систем беспроводной передачи энергии // *Радиотехника*. 2019. №199. С. 59 – 66.
105. Gretskih D. Nonlinear integral equations for multi-input radiating structures / D. Gretskih, A. Luchaninov, V. Aliksieiev, V. Katrich, M. Nesterenko // *Proceedings of the XXV International Seminar on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory*. 2020. P. 97 – 102.
106. Luchaninov A. Two-level Iterative Algorithm for Solving State Equations of the WPT System / A. Luchaninov, D. Gretskih, V. Aliksieiev at all // *16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*. 2022. P. 352 – 357.
107. Hoang H., Bien F. Maximizing Efficiency of Electromagnetic Resonance Wireless Power Transmission Systems with Adaptive Circuits // *Chapters 11 in: Wireless Power Transfer – Principles and Engineering Explorations* Ed. by K.Y. Kim, InTech. 2012. P. 207 – 226.
108. Hirayama H. Equivalent Circuit and Calculation of Its Parameters of Magnetic-Coupled-Resonant Wireless Power Transfer // *Chapters 6 in: Wireless Power Transfer – Principles and Engineering Explorations* Ed. by K.Y. Kim, InTech. 2012. P. 117 – 132.
109. Dionigi M., Mongiardo M. Magnetically Coupled Resonant Wireless Power Transmission Systems with Relay Elements // *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications*. 2012. P. 223 – 226.

Надійшла до редколегії 04.10.2022

Відомості про авторів:

Алексєєв Василь Олександрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри комп'ютерної радіоінженерії та систем технічного захисту інформації, Україна; email: vasyl.aliexsieiev@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3282-5985>

Грецьких Дмитро Вячеславович – д-р техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри комп'ютерної радіоінженерії та систем технічного захисту інформації, Україна; email: dmytro.gretskih@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2645-7872>

Гавва Дмитро Сергійович – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерної радіоінженерії та систем технічного захисту інформації, Україна; email: dmytro.gavva@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4033-7746>

Лихограй Василь Григорович – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерної радіоінженерії та систем технічного захисту інформації, Україна; email: vasyl.lykhograi@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9226-1309>