

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

РЕКТЕНИ СИСТЕМ ЗБОРУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ З НАВКОЛИШНЬОГО ПРОСТОРУ

Вступ

З 1960-х років ректени розглядали як кінцевий пристрій потужних систем безпроводної передачі енергії (БПЕ) сфокусованим мікрохвильовим променем: сонячних космічних електростанцій та енергосистем безпілотних літальних апаратів[1]. Комерційні системи БПЕ в основному обмежувалися безвипромінювальною передачею енергії в ближньому полі для безпроводної зарядки побутової електроніки або в радіочастотній ідентифікації ближньої дії. Досягнення у галузі мікроелектроніки дозволили зменшити енергоспоживання напівпровідникових радіоелектронних пристроїв. З початку 2000-х років виникла можливість розглядати питання живлення малопотужних пристроїв шляхом перетворення енергії навколишнього електромагнітного (ЕМ) випромінювання ректенами в постійний струм. Така навколишня енергія розглядається у світі як "безкоштовне" джерело живлення для малопотужних пристроїв, що робить цю технологію привабливою. У роботі [2] проведено аналіз існуючих технологій БПЕ. Зазначено, що одними з чинників, що визначають вибір тієї чи іншої технології БПЕ є відстань, на яку передається енергія та вид використовуваної ЕМ енергії. Наведено узагальнену структурну схему системи БПЕ. Розглянуто галузі застосування та тенденції подальшого розвитку технології передачі енергії на малі відстані за допомогою індукційного та резонансного методів, технології передачі енергії на великі відстані, технології збору ЕМ енергії з навколишнього простору та її перетворення у постійний струм для живлення малопотужних пристроїв. У статті розглядаються ректени для перетворення ЕМ енергії з навколишнього простору, що створюють радіоелектронні засоби (РЕЗ) різних класів та призначень (доступний рівень густини потоку потужності у навколишньому середовищі знаходиться в межах від 0.0017 до 0.8594 мкВт/см²) в енергію постійного струму. Ректени відносяться до класу антен з нелінійними елементами, і деякі типи таких антен вже розглядалися у попередніх дослідженнях [3, 4].

Стаття складається з двох частин. У першій частині наведено параметри ректен. Друга частина присвячена огляду теорії та практики побудови ректен для систем збору ЕМ енергії.

1. Параметри ректен

У дальній зоні коефіцієнт корисної дії (ККД) ректени η_r визначається наступним чином:

$$\eta_r = P_0 / P_{\text{вх}}, \quad (1)$$

де $P_{\text{вх}} = e_a^2 / 8R_a(f_0)$ – максимальна потужність, яку може вилучити випромінювач ректени з поля падаючої ЕМ хвилі; 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 ; P_0 – потужність постійного струму у навантаженні ректени (під навантаженням будемо надалі розуміти різні компоненти системи збору ЕМ енергії, що потребують постійної напруги).

Коротко зупинимося на механізмах втрат потужності у ректенах (рис. 1). Потужність постійного струму P_0 в навантаженні ректени відрізняється від вхідної потужності $P_{\text{вх}}$ на величину потужності втрат, яка, в свою чергу, складається з потужності втрат у випромінювачі, потужності втрат в елементах кола узгодження (КУ) випромінювача та схеми випрям-

лення. Якщо схема випрямлення не узгоджена належним чином з випромінювачем, то частина падаючої потужності від випромінювача відбиватиметься назад в навколишнє середовище, що призведе до зменшення вхідної потужності на випрямлячі і, як наслідок, зменшення ККД ректени.

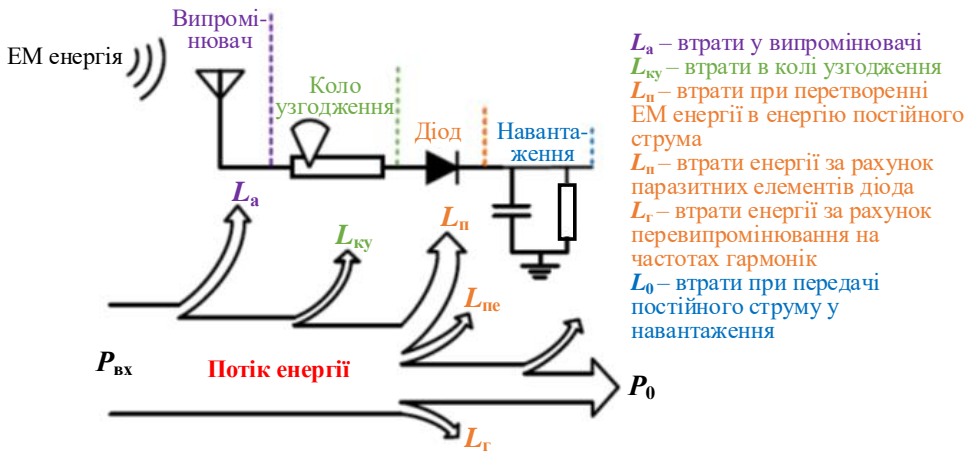


Рис.1. Механізми втрат потужності у ректені

при різних рівнях вхідної потужності. Тому дуже важливо, щоб КУ та випрямляч розроблялися разом, оскільки конструкція кожного з них значно впливає на їх ККД. Крім того, втрати в підкладці ректени та лініях передачі також можуть суттєво впливати на ККД. Потужність втрат у випрямному елементі обумовлена такими чинниками: втратами при перетворенні ЕМ енергії у постійний струм; паразитними елементами випрямних діодів (опір переходу, ємність переходу, паразитні ємності та індуктивності корпусу діода [1]); ємністю переходу та паразитними реактивними елементами корпусу діода, що обмежують максимальну частоту, при якій діод може працювати з прийнятним ККД; втратами потужності за рахунок випромінювання ректеною на частотах вищих гармонік і за рахунок проходження цих гармонік в навантаження.

Рівень побічного випромінювання ректен на частотах гармонік визначається наступним чином [1]:

$$\xi(nf_0) = P_{\Sigma}(nf_0) / P_{vx}, \quad n = 2, 3, \dots, \quad (2)$$

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

Втрати потужності мають місце й в елементах вихідного фільтра ректени.

Малопотужні ректени системи збору ЕМ енергії потрібно характеризувати таким параметром як чутливість. Чутливість визначається як мінімальна падаюча потужність, яка необхідна для запуску роботи системи збору енергії [2]. Чим вища чутливість системи збору енергії, тим краща ефективність перетворення потужності падаючого на ректену ЕМ випромінювання в постійний струм. Чутливість кількісно визначається таким виразом [2]:

$$S_{[дБм]} = 10 \lg(P_{\min} / 1 \text{ мВт}), \quad (3)$$

де P_{\min} – мінімальна потужність, яка необхідна ректені для перетворення ЕМ енергії в постійний струм для подальшої роботи навантаження.

Наприклад, для більшості конкуруючих RFID-схем дальнього поля чутливість у діапазоні від -25 до -10 дБм відповідає робочим рівням вхідної потужності від 3 до 100 нВт.

Результатом роботи системи збору ЕМ енергії є живлення кінцевих пристроїв постійним струмом. Тому вихідна потужність постійного струму P_0 ректени є ще одним показником оцінки ефективності роботи системи збору ЕМ енергії.

Під діаграмою спрямованості (ДС) ректени на основній частоті будемо розуміти залежність ККД ректени від кутових координат при незмінній густині потоку потужності падаючого поля та величини навантаження по постійному струму.

Ефективність ректени для збору ЕМ енергії з навколишнього простору залежить від ефективності окремих її компонентів, тому одним із важливих завдань на шляху впровадження ректен для збору ЕМ енергій в різних сферах життєдіяльності є оптимізація її компонентів. Сучасний стан досліджень в цьому напрямку викладено в наступному розділі.

2. Ректени систем збору ЕМ енергії

2.1. Структурні схеми ректен для збору ЕМ енергії

На рис. 2 наведено типові варіанти схем побудови ректен [5]. Так, на рис. 2, а подано схеми однодіапазонних ректен, в яких вхідний опір випромінювача становить 50 Ом. На рис. 2, б, в, г показано багатодіапазонні та широкосмугові ректени, випромінювачі яких теж мають вхідний опір 50 Ом. У схемі на рис. 2, г може бути використане не широкосмугове КУ, а багатодіапазонне. Зазначимо, що терміни «багатодіапазонні» та «широкосмугові» ректени відрізняються неперервністю їх ширини робочої смуги частот за рівнем $S_{11} < -10$ дБ (на рис. 2 пунктирними лініями позначено площини, в яких необхідно забезпечити смугу пропускання за рівнем коефіцієнта відбиття $S_{11} < -10$ дБ). На рис. 2, д наведено схему побудови електрично малих ректен. На рис. 2, е, ж наведено схеми однодіапазонних та широкосмугових ректен, в яких випромінювачі мають комплексний вхідний опір, який комплексно спряжений з вхідним опором схеми випрямлення. В таких конструкціях ректен відпадає необхідність застосування КУ.

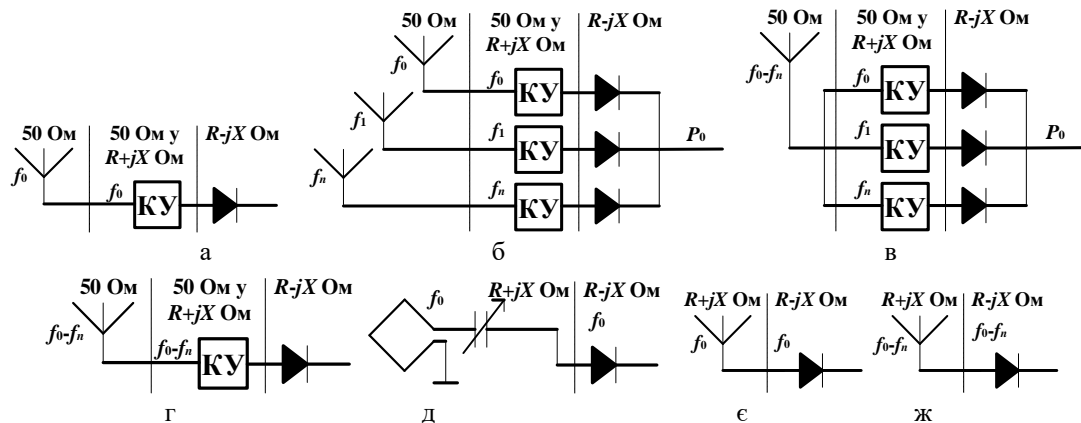


Рис. 2. Схеми побудови ректен

Розглянемо особливості технічної реалізації ректен, які побудовані за різними схемами, та визначимо існуючі проблеми й напрямки вдосконалення технічних характеристик ректен для збору енергії з навколишнього простору.

2.2. Однодіапазонні ректени

Радіочастотне з'єднання за допомогою бокового зв'язку між мікросмужковими лініями

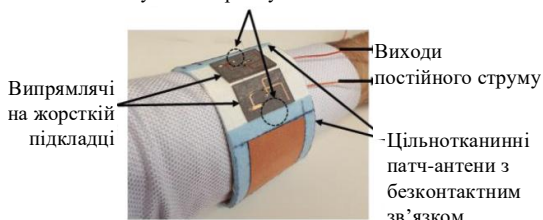


Рис. 3. Фото ректени

Однодіапазонні ректени різноманітних конструкцій були розроблені для збору ЕМ енергії для низьких частотних діапазонів: 2G/GSM-900/1800, 3G/UMTS, 4G/LTE, 5G (стільниковий зв'язок), Wi-Fi (абонентський радіодоступ), DTV (цифрове телебачення), FM та AM (радіомовлення). Наприклад, у роботі [6] запропоновано ректену для збору енергії на частоті 2,45 ГГц, яка побудована за схемою рис. 2, а. Ректена була розміщена на гнучкому браслеті (рис. 3) та складається з двох ректенних елементів, які можуть працювати незалежно, об'єднуватися по постійному струму послідовно або паралельно. Два прямокутних мікросмужкових випромінювача ректени реалізовано на багатошаровій підкладці з тканини, а схеми випрямлення розташовано на жорсткій підкладці. Зв'язок між випромінювачем та випрямлячем реалізовано за допомогою бокового зв'язку між мікросмужковими лініями (безконтактне електричне з'єднання).

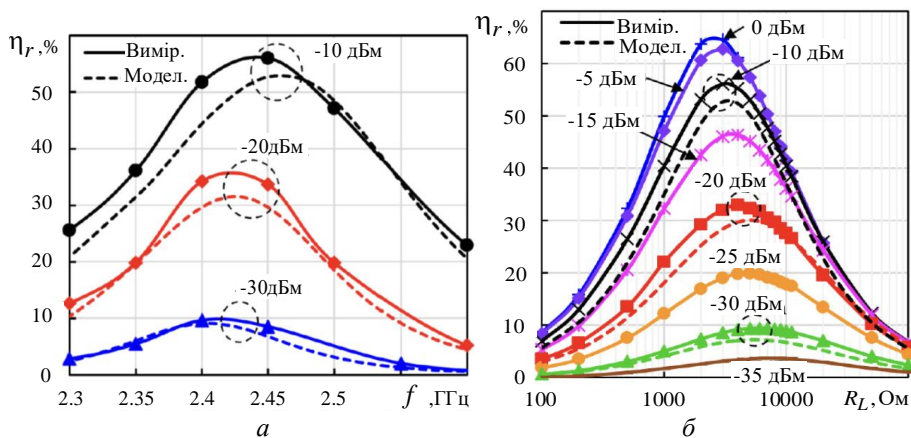


Рис. 4. Теоретичні та експериментальні залежності ККД випрямлення від частоти (а) та опору навантаження (б) при різних рівнях вхідної потужності

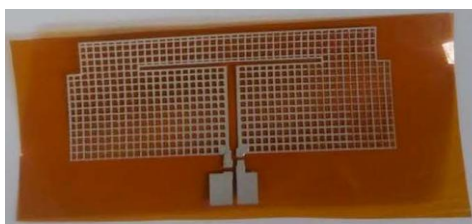


Рис. 5. Оптично прозора ректена

підкладці з втратами. Результати експериментальних досліджень показали, що така ректена може забезпечити в навантаженні потужність постійного струму 12,5 мкВт та напругу 500 мВ.

На сьогодні радіочастотна електроніка та антени в гнучкому виконанні розглядаються як технологія виготовлення пристроїв інтернету речей (IoT) та мереж датчиків на тілі людини без використання батарей живлення. Це призвело до великої кількості досліджень щодо використання носимих ректен, в яких використовуються як гнучкі та текстильні матеріали в якості підкладки, так і тверді підкладки нетекстильного типу [9 – 12].

Велика увага приділяється ректенам з диференціальним (симетричним) живленням. Диференціальний вхід у випрямлячі зазвичай призводить до підвищення ККД ректени в порівнянні з несиметричними випромінювачами та відповідає необхідності у додаткових балунах. У роботах [13 – 16] розроблено мікросмужкові ректени із диференційною схемою випрямлення. Типову схему побудови таких ректен наведено на рис. 6, а [13]. Для ректени, зображеної на рис. 6, б, максимальний ККД досягає 65,3 % при вхідній потужності 2,19 дБм на частоті 980 МГц.

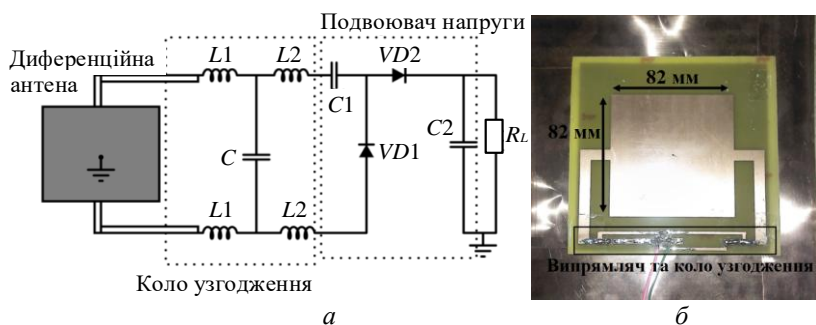


Рис. 6. Схема ректени з диференційною схемою випрямлення (а) та її фото зверху (б)

розроблено у [19]. При рівні вхідної потужності -20 дБм час зарядки двох суперконденсаторів ємністю 1F, з'єднаних паралельно, становить 6 годин для напруги в навантаженні 1 В. Діапазон FM є потенційним джерелом збору ЕМ енергії через його широку доступність, менші втрати на трасі поширення радіохвиль та більш прості конструктивні рішення ректен.

На рис. 4. наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень характеристик ректени. З рис. 4,б видно, що ККД ректени нелінійно залежить від рівня вхідного впливу та опору навантаження. При деякому оптимальному опорі навантаження ККД досягає максимуму.

Останнім часом значний інтерес викликали оптично прозорі ректени. Наприклад, їх можна розміщувати на сонячних батареях [7], тим самим підвищуючи загальну ефективність енергосистеми. У [8] подана гнучка оптично прозора ректена (рис. 5) для збору енергії від базових станцій. Ректена побудована за схемою на рис. 2, є. Випромінювач ректени виготовлений на недорогому принтері з використанням срібного чорнила на

Для мініатюрних систем та пристроїв з безпроводним живленням, таких як медичні імпланти, пристрої IoT тощо, необхідні вбудовані компактні ректени, здатні ефективно захоплювати енергію ЕМ хвиль у заданому діапазоні частот та перетворювати її в постійний струм. Мініатюризація випромінювальних структур зазвичай виконується з використанням діелектриків чи магнітних матеріалів з високими відносними діелектричними та магнітними проникностями [20], зокрема метаматеріалів [21] або модифікації геометрії та конструкції випромінювача (навантаження провідних антен на реактивні елементи, застосуванням щілин та надрізів металізації, згинання та меандрування провідних елементів, фрактальні структури, тощо) [22 – 25]. На рис. 7 наведено приклади реалізації компактних ректен.

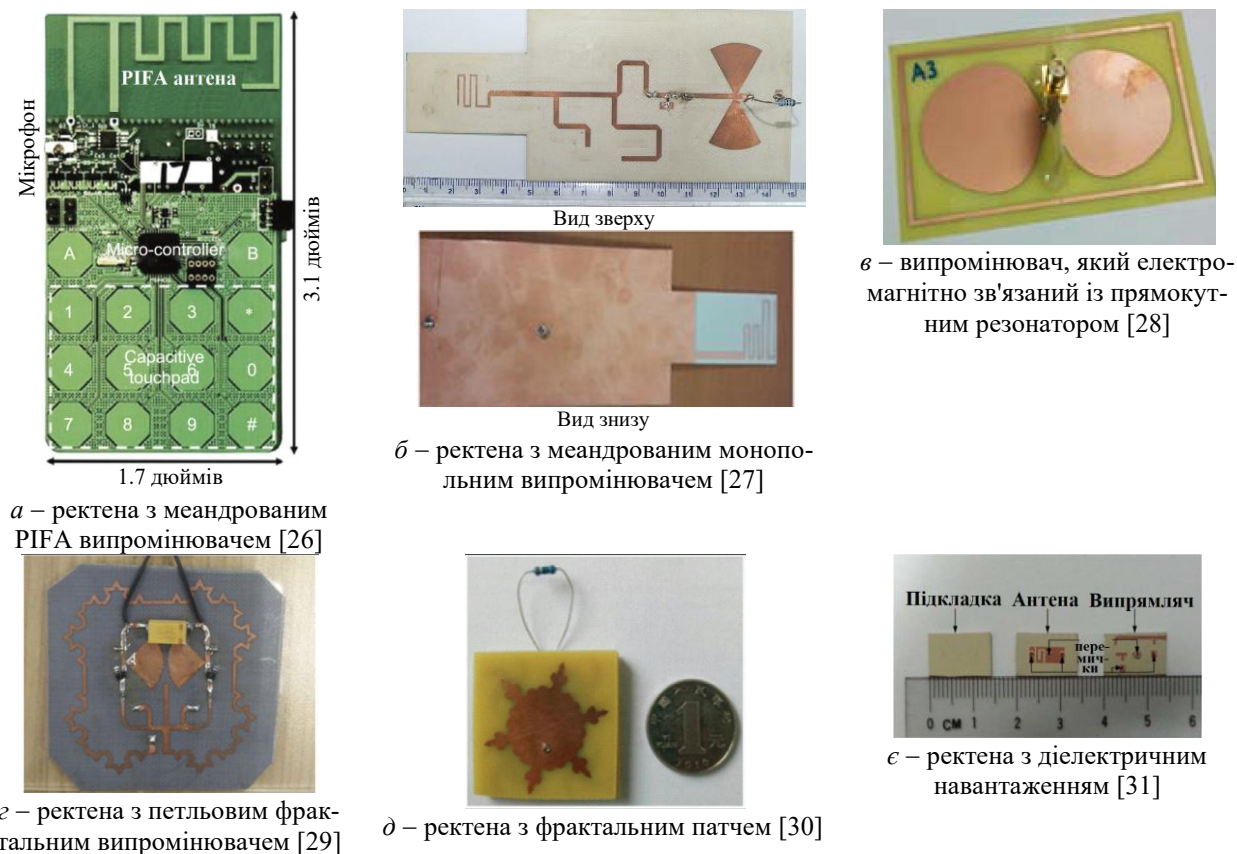


Рис. 7. Приклади реалізації компактних ректен

Ректени на основі меандрованої плоскої перевернутої F-антени (PIFA) є однією з найпопулярніших компактних конструкцій [26, 32 – 34]. Наприклад, ректена з меандрованим PIFA випромінювачем (рис. 7, а) була розроблена у [26] для створення мобільного телефону з безпроводним живленням. Інший метод мініатюризації включає проектування меандрованих монопольних або дипольних випромінюючих структур (рис. 7, б) ректен [27, 35]. Спосіб мініатюризації габаритних розмірів ректени за рахунок розміщення плоского дипольного випромінювача квазікруглої форми в прямокутному резонаторі (рис. 7, в), що дозволяє зменшити його розміри на 21,5 % без погіршення характеристик, запропоновано в роботі [28]. Авторами [29] розроблено компактну ректену за рахунок вбудови випрямляча всередину фрактальної рамкової випромінюючої структури (рис. 7, г). У роботах [30, 36, 37] були розроблені мініатюрні ректени на основі фрактальних патчів. Для подальшого зменшення розмірів ректен, які використовуються в медичних імплантах, в [31, 38, 39] були розроблені конструкції ректен з діелектричним навантаженням (рис. 7, е).

2.3. Електрично малі ректени

Використання електрично малих випромінювачів у ректенах має дві ключові переваги [40]: по-перше, немає необхідності включати додаткове КУ між випромінювачем та випрям-

лячем завдяки високому ємнісному/індуктивному вхідному опору самих випромінювачів, і, по-друге, ректени мають відносно невеликі розміри. Електрично малим випромінювачем вважається той, для якого виконується умова $ka \leq 1$ (де k – хвильове число у вільному просторі, a – радіус умовної сфери, що охоплює максимальний розмір випромінювача). Тобто, електрично малі випромінювачі мають розміри істотно менші за довжину хвилі, на якій вони працюють. Слід зазначити, що термін "малі" стосується електричних характеристик, а не габаритних розмірів. Електрично малі ректени викликають інтерес, коли ректену необхідно інтегрувати в малогабаритні пристрої або системи. Одним з інноваційних підходів у розробці електрично малих ректен є застосування метаматеріалів. Метаматеріали [41, 42] – це штучно створені композитні матеріали, які складаються з субхвильових металічних або діелектричних включень, що мають довільні розміри та форму. Штучна періодична структура модифікує діелектричну та магнітну проникності вихідного матеріалу, що дає можливість керувати законами дисперсії, заломленням та відбиттям ЕМ хвиль у метаматеріалі. Таким чином, метаматеріали є тривимірними структурами зі штучно створеними ЕМ властивостями, яких немає в природі. Метаповерхні є двовимірними еквівалентами метаматеріалів. Використання метаструктур дозволяє підвищити ККД перехоплення ЕМ енергії за рахунок узгодження поверхневого імпедансу з імпедансом вільного простору [43].

У роботах [44, 45] були створені електрично малі ректени шляхом об'єднання взаємно-ортогональних електричних та магнітних метаматеріальних резонаторів/диполів, що дозволило створити ДС ректени у формі кардіоїди (рис. 8), подібної ДС елемента Гюйгенса [46].

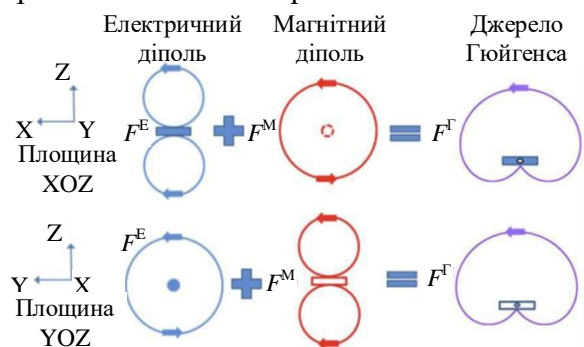


Рис. 8. Реалізація ректен Гюйгенса (F^E , F^H – нормовані діаграми спрямованості в Е та Н площинах)

У літературі такі ректени називають ректенами Гюйгенса [45]. Приклад випромінювача Гюйгенса з лінійною поляризацією та коаксіальним живленням наведений на рис. 9. Автори [47] у керуючий диполь (рис. 9, з) інтегрували схему випрямлення (рис. 10, а), яка реалізована на SMD компонентах Murata. Загальна довжина схеми випрямлення становила всього 7,3 мм ($0,02\lambda$).

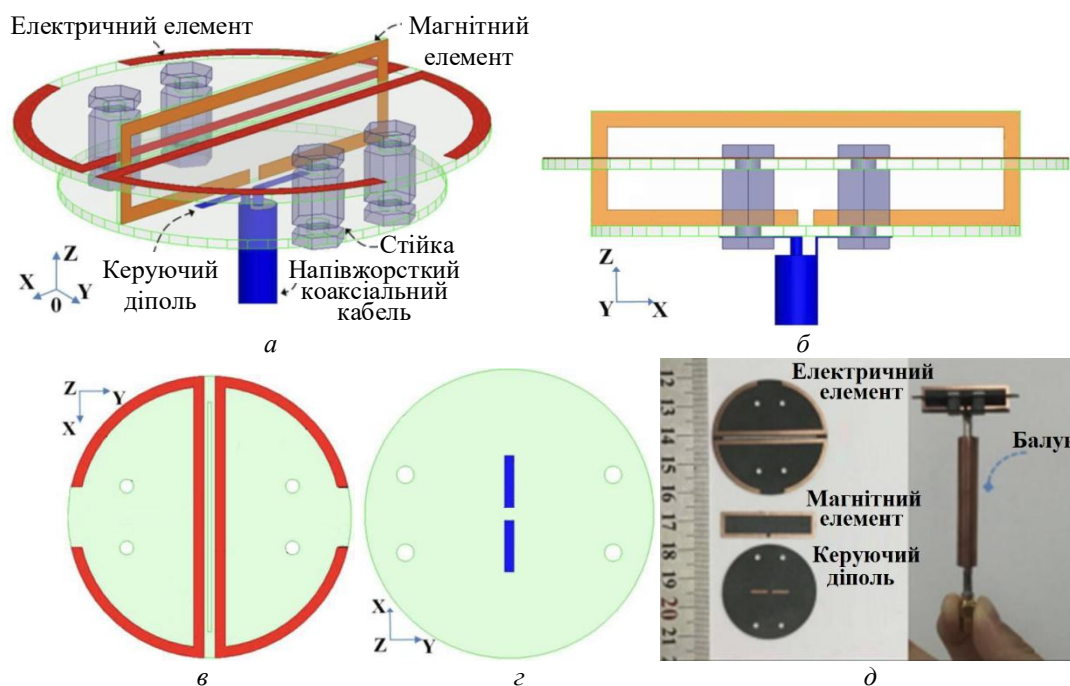


Рис. 9. Конструкція випромінювача Гюйгенса: а – тривимірне зображення, б – вид збоку на магнітний елемент, в – вид зверху на електричний елемент, г – вид знизу на керуючий диполь, д – фото випромінювача Гюйгенса

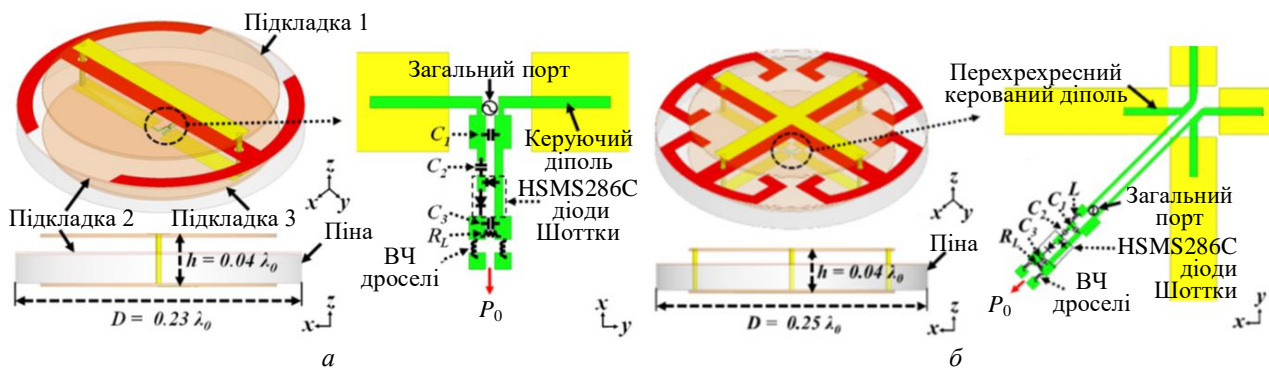


Рис. 10. Конфігурація електрично малих ректен Гюйгенса: *a* – з лінійною поляризацією, *б* – з круговою поляризацією

На відміну від дослідження [44], у [47] вхідний опір випромінювача був комплексним (замість звичайних 50 Ом), а саме комплексно спряженим з вхідним опором схеми випрямлення. Це дозволило уникнути використання КУ в конструкції ректени і, отже, знизити втрати при випрямленні приблизно на 6 %. Розроблена конструкція ректени компактна і електрично мала ($ka < 0.77$), здатна приймати ЕМ хвилі в широкому діапазоні кутів (ширина ДС $\pm 67^\circ$ на рівні -3 дБ) з високим ККД, який досягає 89 % на частоті 915 МГц.

Автори дослідження [44] стверджують, що ректени з круговою поляризацією мають значні переваги перед ректенами з лінійною поляризацією при певних сценаріях їх використання, особливо тоді, коли поляризація джерела випромінювання невідома. У роботі [45] була розроблена електрично мала ректена з круговою поляризацією (рис. 10, *б*), яка об'єднує дві ортогональні пари електричних і магнітних випромінювачів. Максимальний ККД цієї ректени склав 82,2 %, який виявився меншим, ніж у роботі [47] (88,9 %). Зниження ККД пояснюється наявністю КУ в конструкції ректени, зокрема індуктивності L (рис. 10, *б*), яка й зумовлює втрати. КУ було включено в структуру ректени тому, що не вдалося реалізувати опір випромінювача комплексно спряженим вхідному опором схеми випрямлення, як це було зроблено у [47].

Про успішне використання електрично малих ректен для забезпечення енергією датчиків температури та освітленості в музеї повідомляється в [48], а в [49] подана двофункціональна електрично мала ректена ($ka = 0,77$), яка може застосовуватися в системах одночасної безпроводної передачі інформації та енергії. Це особливо актуально в контексті створення сенсорних мереж з безпроводним живленням, де потрібно забезпечувати як передачу інформаційних сигналів, так і енергії між передавачем сенсорної мережі та її вузлами [50].

2.4. Ректенні решітки

Для деяких застосунків ректенний елемент в одній смузі частот не може забезпечити достатньої потужності постійного струму для живлення навантаження. Одним зі способів вирішення цієї проблеми є об'єднання ректенних елементів у решітки. При цьому важливо визначитися зі способом об'єднання ректенних елементів, особливо коли густина потоку потужності, що падає на ректену, є низькою. На основі аналізу численних теоретичних та експериментальних досліджень ректенних решіток [51 – 53] можна виділити три можливі варіанти їх побудови (рис. 11). Кожен із варіантів має як свої переваги, так і недоліки. У ректенних решітках, які реалізовані згідно зі схемою рис. 11, *а*, потужність складається на робочій частоті (когерентна схема) і потім спрямовується на загальну схему випрямлення. За рахунок спрямованих властивостей решітки (рис. 12, *а*), потужність, яка подається на схему випрямлення, збільшується, що в підсумку призводить до підвищення ККД ректени. Ректенні решітки, що побудовані за такою схемою, найбільше підходять для сценаріїв їх застосування, коли розташування джерела випромінювання фіксоване і відоме. У ректенних решітках, які побудовані за схемою рис. 11, *б*, потужність складається по постійному струму (некогерентна схема). Цей метод побудови ректенних решіток відрізняється простотою структури та

модульністю. Коефіцієнт підсилення, ширина ДС (рис. 12, б) та ККД аналогічні тим, що при-
таманні одиночному ректенному елементу решітки. Завдяки широкій ДС такі ректенні реші-
тки підходять для сценаріїв застосування, коли ЕМ хвилі надходять з різних довільних
напрямків, тобто коли положення джерела випромінювання невідоме. Вихідну потужність
постійного струму можна збільшити, додавши ректенні елементи.

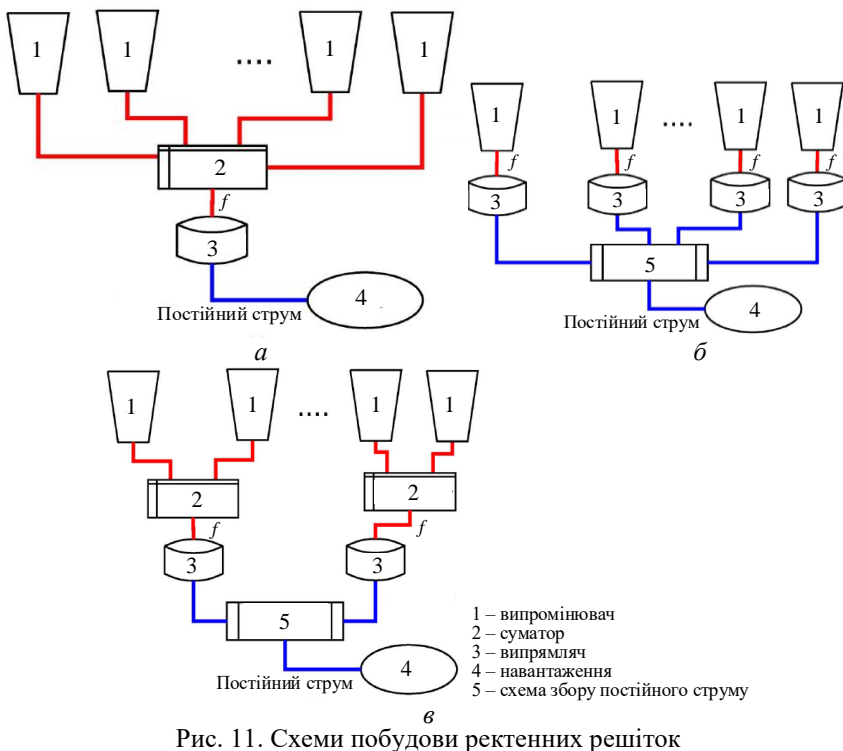


Рис. 11. Схеми побудови ректенних решіток

решіток є використання в них метаматеріалів. Такі ректенні решітки, які побудовані за
схемами на рис.11, а, б, досліджувалися в [45] (рис. 12).

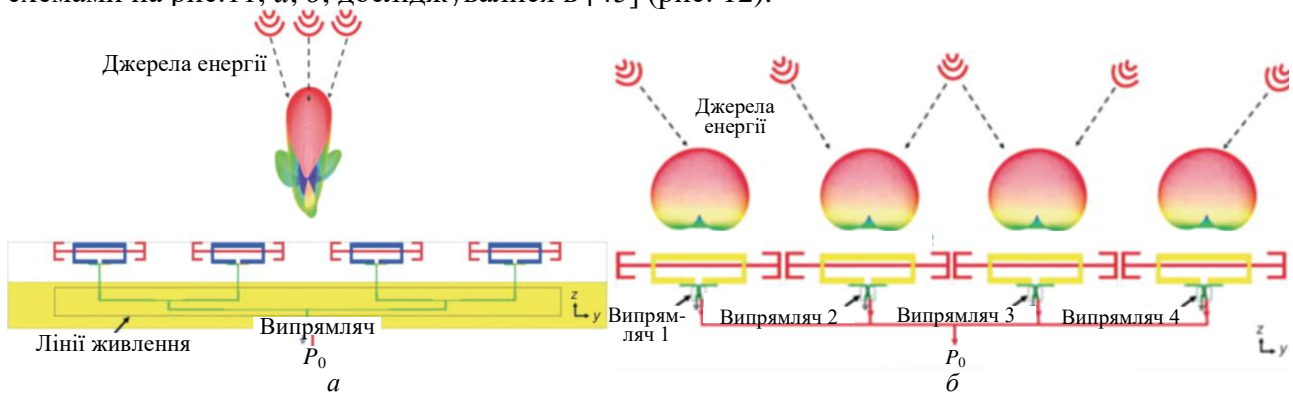


Рис. 12. Ректенні решітки та їх ДС: а – складання потужності на робочій частоті (рис. 11, а),
б – складання потужності по постійному струму (рис. 11, б)

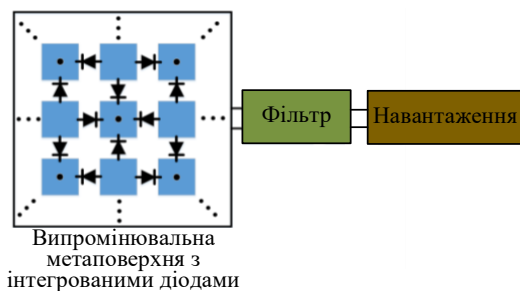


Рис. 13. Ректенна решітка з інтегрованими
у випромінювальну структуру випрямними
діодами

Компактні конструкції ширококутних та неза-
лежних від кута поляризації ректенних решіток
запропоновано в [43, 53]. Ректена складається з
періодичної решітки випромінювачів на основі
метаповерхонь з вбудованими в неї діодами
(рис. 13), фільтра нижніх частот і навантаження. КУ
між випромінювачами та випрямними діодами не
використовується, тому що в такій конструкції вда-
ється реалізувати опори випромінювачів комплекс-
но спряженими опорам випрямних діодів. На
рис. 14, 15 наведено приклади технічної реалізації

У роботі [52] запропо-
новано частково усунути
зазначені вище недоліки ре-
ктенних решіток, побудова-
них відповідно до схем на
рис. 11, а, б шляхом комбі-
нованого (на робочій частоті
і по постійному струму)
об'єднання ректенних еле-
ментів (рис. 11, в).

При збільшенні числа
ректенних елементів у ре-
шітці схема об'єднання по-
тужності стає складною, що
може призвести до значного
збільшення габаритних роз-
мірів решітки, втрат енергії,
підвищення вартості її ви-
готовлення. Одним зі
шляхів мінімізації габарит-
них розмірів ректенних

таких ректенних решіток і результати їх теоретичних та експериментальних досліджень. Автори [43] відзначають, що нелінійність діодів та виробничі помилки при їх виготовленні можуть викликати невеликий зсув частоти в експерименті, тобто призвести до інших результатів (рис. 14, в) на відміну від теоретичних досліджень.

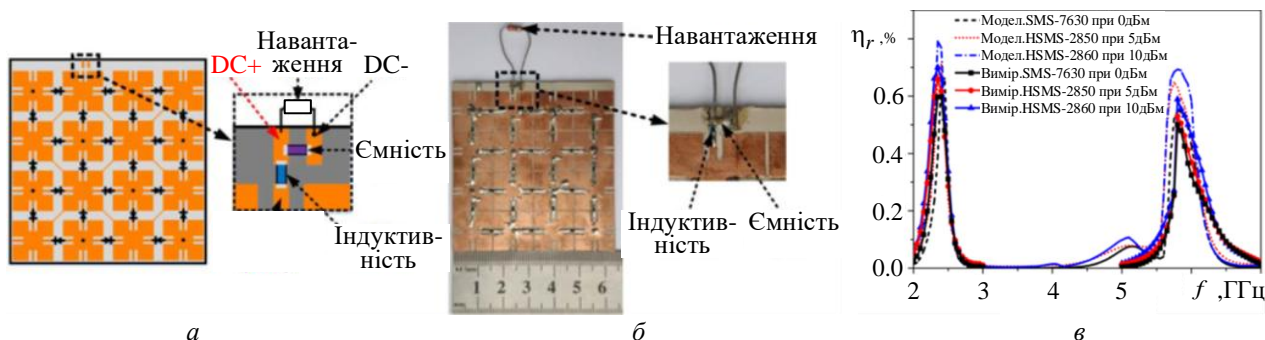


Рис. 14. 4×4 ректенна решітка [43]: а – топологія решітки, б – фото експериментального зразка, в – результати теоретичних та експериментальних досліджень ККД

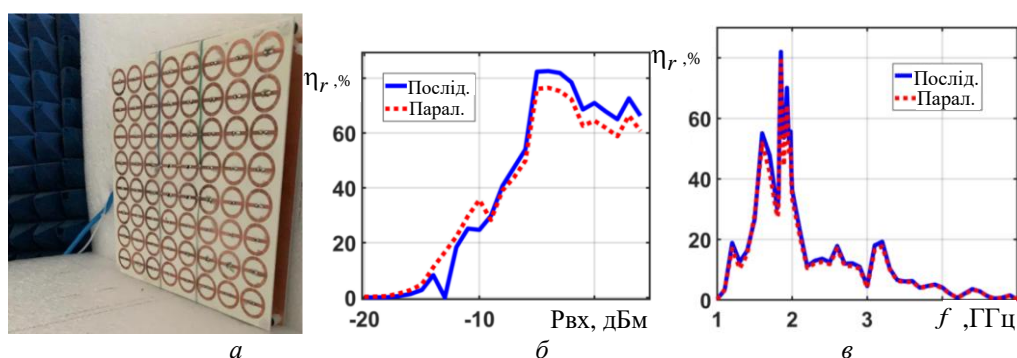


Рис. 15. Фото ректенної решітки 8×8 (а) [53], результати вимірювань ККД ректени при паралельному і послідовному з'єднанні ректенних елементів по постійному струму залежно від вхідної потужності (б) і частоти (в)

В [54] обгрунтовано ще один підхід конструктивної реалізації ректен для вирішення проблеми збільшення потужності постійного струму у навантаженні при низькій вхідній потужності. А саме, запропоновано конструкцію ректени на основі фокусувальної метаповерхні (рис. 16). Ректена розміщується у точці фокусування і перетворює концентрований ЕМ пучок в постійний струм.

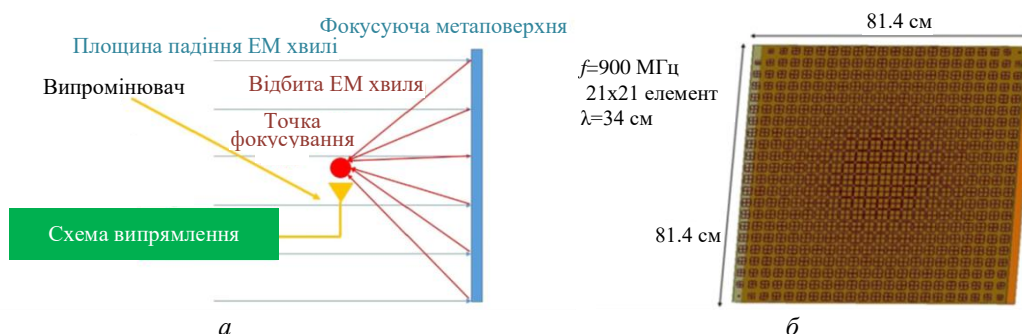


Рис. 16. Концепція побудови ректен на основі фокусувальної метаповерхні (а) та фото метаповерхні (б)

Перспективність застосування описаного підходу для збору ЕМ енергії з навколишнього простору підтверджується експериментальними даними. Показано, що виграш у прийнятій потужності стає більшим у вісім разів в порівнянні з ректеною без фокусувальної метаповерхні.

2.5. Багатодіапазонні та широкосмугові ректени

Конструкції однодіапазонних ректен сприяють досягненню високого рівня ККД перетворення ЕМ енергії в постійний струм, але кількість вихідної потужності постійного струму обмежена. Багатодіапазонні (багатосмугові) або широкосмугові ректени можуть накопичува-

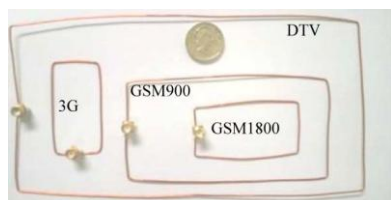


Рис. 17. Випромінювальна структура багатодіапазонної ректени

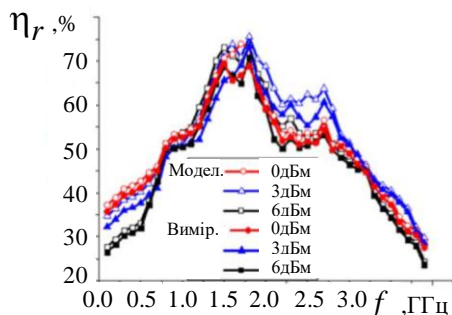
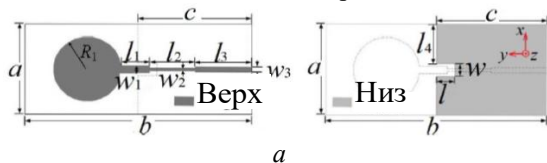


Рис. 18. НШС ректена

від заземленої копланарної лінії та ширококутним подвоювачем постійної напруги. Автори зазначають, що копланарні випромінювальні структури займають меншу площу, ніж аналогі в мікросмушковому виконанні, мають широкую смугу пропускання, а копланарні лінії передачі мають також низку переваг: простота інтеграції з активними та пасивними елементами ректени; висока щільність інтеграції схеми; мала дисперсія та відсутність перехідних отворів заземлення (спрощується проектування схем випрямлення ректен).

Дослідженню ширококутної ректени для збору ЕМ енергії у чотирьох частотних діапазонах: мереж стільникового зв'язку (GSM-900/1800, 3G/UMTS) та Wi-Fi присвячена робота [59]. Проведено порівняльний аналіз двох варіантів схем побудови ректен (рис. 2, в, г) з точки зору аналізу особливостей реалізації вхідних смугових фільтрів для узгодження опорів випромінювача та схеми випрямлення. Зазначено, що вхідний опір схеми випрямлення змінюється в залежності від частоти і рівня падаючої потужності. Опір випромінювача також залежить від частоти. Виходячи з цього, при узгодженні в кількох діапазонах (рис. 2, г) виникає два види втрат: втрати через неузгодженість опорів і втрати через складну конструкцію ширококутного або багаточастотного фільтра (для ідеального узгодження на кількох частотах потрібні вхідні смугові фільтри високого порядку). Таким чином, щоб підвищити ККД перетворення ЕМ випромінювання в постійний струм, автори запропонували збирати енергію з кількох вузькосмугових радіочастотних діапазонів, а не з одного ширококутного, використовуючи ректену, схема якої показана на рис. 2, в. У кожній смузі частот використовуються окремі смугові фільтри і схеми випрямлення, а виходи по постійному струму схем випрямлення підключаються до загального навантаження для складання зібраної потужності. В [59] також відзначено, що збір потужності у широкій смузі частот можна реалізувати кількома вузькосмуговими ректенами (рис. 2, б), проте такі конструкції не завжди підходять для компактних пристроїв через велику кількість використовуваних випромінювальних структур. Застосування ширококутної випромінювальної структури (рис. 19, а) дозволяє створити більш компактну ректену.

У роботі [60] подано шестисмугову ректену для збору енергії ЕМ хвиль з довільною поляризацією. Ректена має широкую смугу пропускання від 550 МГц до 2,5 ГГц (охоплює шість

ти більше енергії від малопотужних навколишніх джерел і виробляти більшу вихідну потужність, ніж вузькосмугові [55]. Випромінювальна структура багатодіапазонної ректени, яка побудована за схемою на рис. 2, б, наведена на рис. 17 [56]. Петльові тонкопроводи однодіапазонні випромінювачі розміщені на підкладці з плексигласу. Збір ЕМ енергії в чотирьох частотних діапазонах дозволив при рівні вхідної потужності всього -29 дБм без будь-якого зовнішнього джерела живлення постійного струму запустити перетворювач напруги BQ25504 фірми Texas Instruments Incorporated.

Надширококутна (НШС) компактна ректена (рис. 18, а) з круглим мікросмушковим випромінювачем (розроблена за схемою рис. 2, г) запропонована у [57]. Результати моделювання та експериментальних досліджень у смузі частот від 0.9 до 3 ГГц (діапазони GSM, Wi-Fi та WLAN) наведені на рис. 18, б.

У [58] за схемою на рис. 2, г розроблено компактну ширококутну ректену з щілинним випромінювачем (ширина ДС 60°), який живиться

діапазонів частот, включаючи частину діапазону цифрового телебачення та більшість діапазонів стільникового мобільного зв'язку та WLAN). Схему ректени наведено на рис. 20, а.

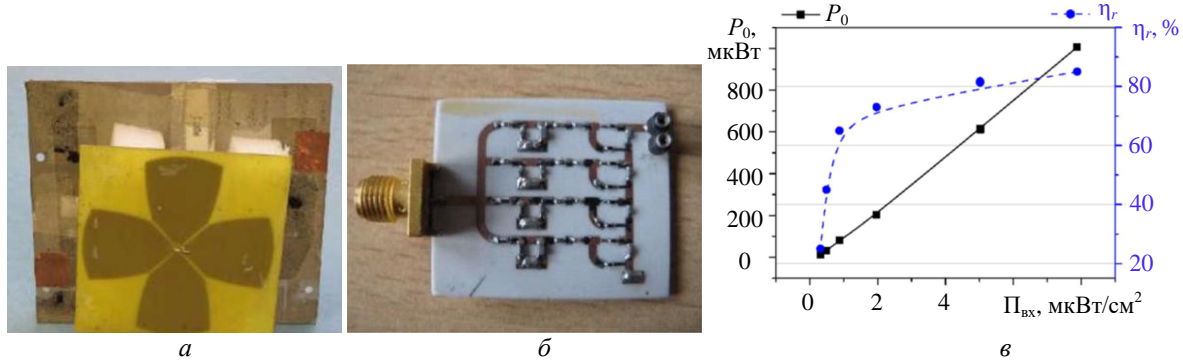


Рис. 19. Фото випромінювача (а) та схеми випрямляча ректени (б), результати вимірювання параметрів ректени на частотах 0,9; 1,8; 2,1; 2,4 ГГц (в) при навантаженні 11 кОм, що моделює типовий опір сучасних датчиків

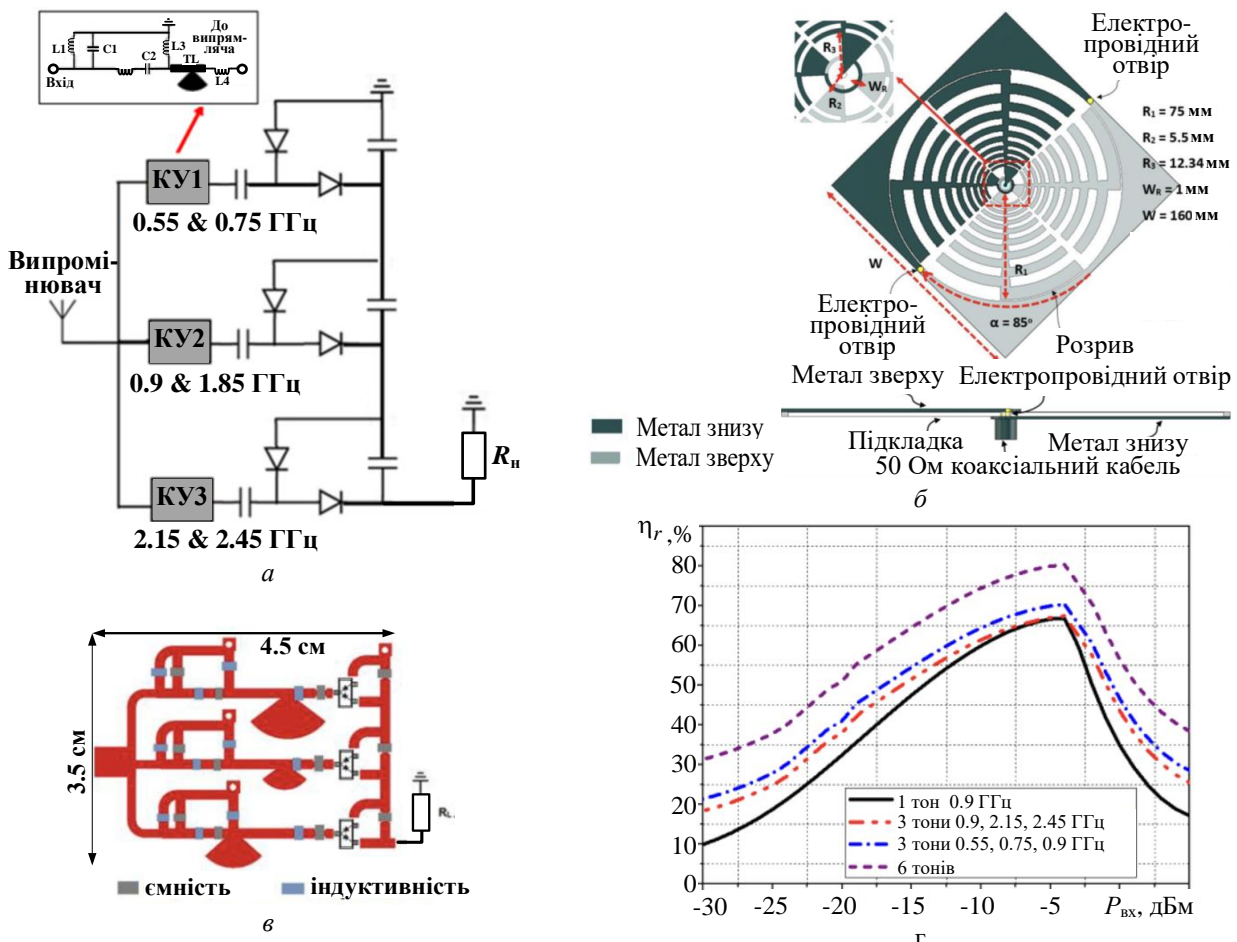


Рис. 20. Шестисмугова ректена: а – структурна схема; б – випромінювальна структура; в – топологія випрямної схеми; г – результати моделювання ККД

Ректена побудована як комбінація схем рис. 2, в, г. Для зменшення габаритних розмірів ректени було обрано кільцеву копланарну широкопasmову випромінювальну структуру (рис. 20, б). Покриття шести діапазонів частот було здійснено за допомогою трьох дводіапазонних кіл узгодження (КУ1, КУ2, КУ3), кожне з яких було підключено до однієї схеми випрямлення з подвоєнням напруги (рис. 20, а). Кола узгодження оптимізовані для рівнів вхідної потужності від -30 до -10 дБмВт і для опорів навантаження від 1 до 100 кОм. Три схеми випрямлення з'єднані послідовно, щоб отримати більш високу вихідну напругу. Топологія схеми випрямлення наведена на рис. 20, в, а результати моделювання ККД при опорі навантаження 25 кОм – на рис. 20, г.

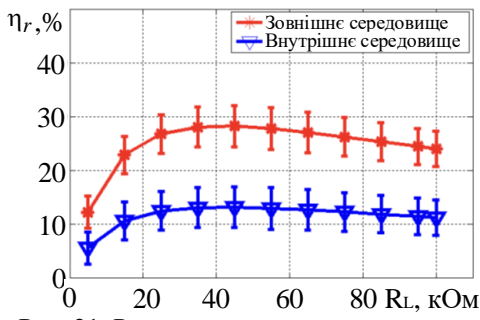


Рис. 21. Результати експериментальних досліджень ректени

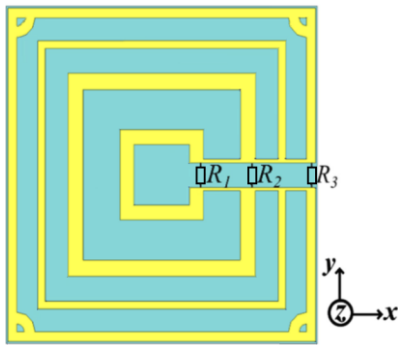
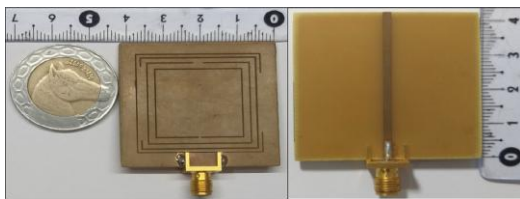


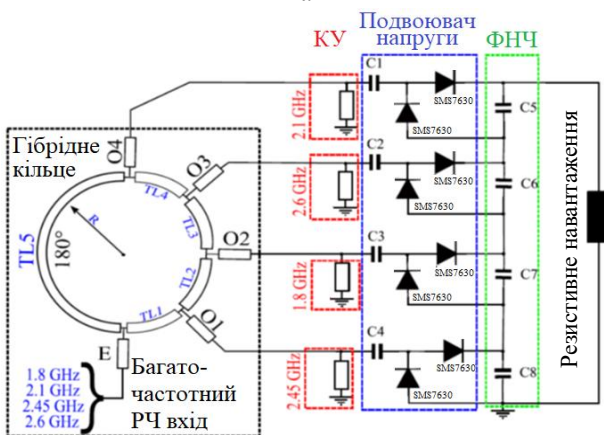
Рис. 22. Багато діапазонний випромінювач ректени

сті, відсутності взаємного зв'язку між їх елементами та багаточастотність.

В [62] подано чотиридіапазонну (GSM 1,8 ГГц, UMTS 2,1 ГГц, Wi-Fi 2,45 ГГц, 4G 2,6 ГГц) ректену на основі метаматеріалу з модифікованим гібридним кільцевим випрямлячем з чотирма гілками випрямлення.



а



б

Рис. 23. Випромінювач ректени (а) та її схема випрямлення (б)

На рис. 21 наведено результати експериментальних досліджень залежності ККД ректени від опорного навантаження в приміщенні та поза його межами. Показано, що ректена стабільно працює у широкому діапазоні навантажень від 10 до 75 кОм, що відповідає еквівалентному опорному навантаженню багатьох безпроводних датчиків та пристроїв. Максимальна потужність постійного струму ректени в типовому зовнішньому та внутрішньому середовищах відповідно становить 26 і 8 мкВт, тому ректену можна застосувати у низці безпроводних застосунків з низьким енергоспоживанням.

Автори [61] продемонстрували ректену на основі метаматеріалу для збору енергії в діапазонах частот GSM та Wi-Fi. Випромінювач складається з чотирьох вкладених резонаторів з роз'ємними кільцями, які з'єднані між собою на своїх роз'ємних частинах (рис. 22). ККД ректени становить 85,7 %, 82 %, 80,4 % і 69,8 % на частотах 0,90 ГГц, 1,80 ГГц, 2,6 ГГц та 5,8 ГГц відповідно, а середній ККД у чотирьох діапазонах становить 79,5 %. Показано, що при додаванні резонаторів у запропоновану структуру можна реалізувати збір енергії в п'яти- і шестичастотних смугах. Автори роботи наголошують, що випромінювальні структури на основі метаматеріалів мають низку переваг з точки зору компактності,

відсутності взаємного зв'язку між їх елементами та багаточастотність. В [62] подано чотиридіапазонну (GSM 1,8 ГГц, UMTS 2,1 ГГц, Wi-Fi 2,45 ГГц, 4G 2,6 ГГц) ректену на основі метаматеріалу з модифікованим гібридним кільцевим випрямлячем з чотирма гілками випрямлення. Габаритні розміри випромінювача (рис. 23, а) вдалося зменшити на 63,75 %, а схеми випрямлення (рис. 23, б) – на 23,62 % в порівнянні зі звичайними конструкціями. Гібридна кільцева сполука використовується для незалежного узгодження схем випрямлення в кожній смузі частот. Зі зміною електричної довжини і характеристичного опору кожної лінії передачі гібридного сполучного кільця був реалізований смуговий фільтр, який ділить вхідний багатотональний сигнал на однотональні, кожен з яких надходить на свій випрямляч (подоювач напруги Віларда). Далі потужність складається по постійному струму. Ректена ефективно перетворює ЕМ енергію створювану базовою станцією в радіусі 50 м на корисну потужність постійного струму, що дозволило включити цифровий годинник без батареї.

Дводіапазонні ректени з фрактальними випромінювачами (рис. 24) досліджувалися у [63, 64]. Наприклад, у роботі [63] подано компакту ректену (рис. 24, а), яка побудована за схемою рис. 2, в. Результати досліджень показали, що розроблена ректена демонструє відно-

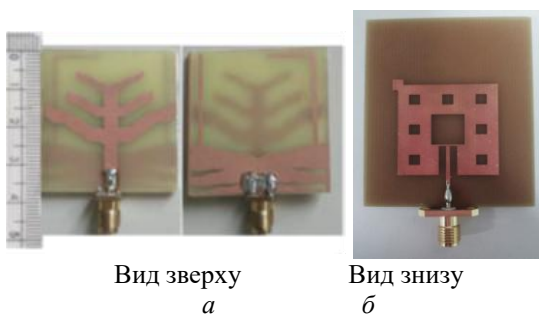


Рис. 24. Фрактальні випромінювачі ректен

сно стабільний ККД для значень навантаження в межах від 0,9 до 20 кОм при низькій вхідній потужності. Максимальний ККД становить 60 % на частоті 2,45 ГГц і 53 % на частоті 3,5 ГГц при вхідній потужності 0 дБм. У дослідженні [64] розроблено двочастотний (2,45 та 5,8 ГГц) випромінювач для ректени на основі фрактала Серпінського (рис. 24, б) зі зменшеним розміром (на 25,98 %) порівняно зі звичайним патч-випромінювачем. Додатково до мініатюризації

та дводіапазонного характеру розроблений випромінювач також усуває небажані гармоніки.

Очікуване масове розгортання ректен у застосунках IoT додає більш жорсткі обмеження щодо вартості та естетики [65]. Тому стають актуальними задачі, пов'язані з виготовленням ректен естетичного вигляду на підкладках із поширених конструктивних матеріалів (гіпс, дерево, оргскло тощо).

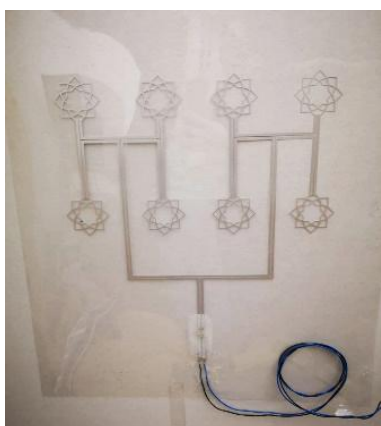


Рис. 25. Фото 8 елементної ректенної решітки

Наприклад, у [65] срібною фарбою на аркуші поліетилентерефталату надруковано випромінювальну структуру ректени, яка була розміщена на підкладці з гіпсокартону без поверхні заземлення для роботи в діапазоні 2,18 – 3,96 ГГц (рис. 25). Фрактальна решітка випромінювачів з восьми елементів забезпечує коефіцієнт підсилення 9,96 дБі на частоті 2,4 ГГц. Експериментальні результати показують, що ректенна решітка здатна забезпечити ККД більше 20 % при падаючій густині потоку потужності всього 0,028 мкВт/см², при цьому піковий ККД (61,3 %) забезпечується при падаючій густині потоку потужності 5,07 мкВт/см², що відповідає постійній напрузі 0,44 В у навантаженні 2,5 кОм. Отримані результати показують, що запропонована методологія виготовлення ректен може забезпечити масове

недороге розгортання у приміщенні мережі безпроводних датчиків для технології IoT. В майбутньому друкування випромінювальної структури можна реалізувати безпосередньо на гіпсокартоні.

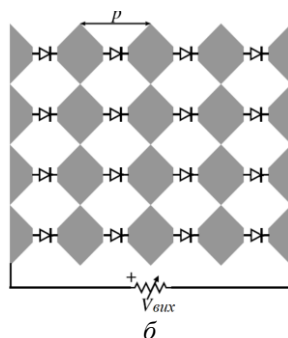
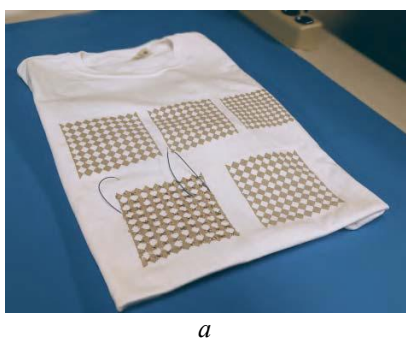


Рис. 26. Футболка з декількома ректенними решітками (а), та принципова схема підрешітки 4×4, яка показує з'єднання випрямних діодів з навантаженням (б)

У статті [66] подані 16- та 81- елементні широкосмугові ректенні решітки, які виготовлені методом трафаретного друку на бавовняній футболці (рис. 26), для збору ЕМ енергії з рівнями густини потоку потужності 4 – 130 мкВт/см² у діапазоні частот від 2 до 5 ГГц. Дослідження показали, що потужність постійного струму становить 32 мкВт у навантаженні 2 кОм при густині потоку падаючої потужності 4 мкВт/см².

Ще одним з підходів до збільшення потужності постійного струму у навантаженні є розробка тривимірних багатосмугових ректен [67, 68]. Чотиридіапазонна (FM-діапазон 98 МГц, GSM900, GSM1800, Wi-Fi 2,4 ГГц) тривимірна ректена для забезпечення живлення вузлів IoT була досліджена у [67]. Чотири ідентичні кросдипольні випромінювачі з подвійною поляризацією та асиметричними щілинами (рис. 27, а), що забезпечують приймання у трьох верхніх діапазонах частот, розташовані на тривимірній кубічній конструкції (10×10×10 см³). Усередині куба знаходиться суматор потужності та КУ. Несиметричний підвісний випромінювач з індуктивним наванта-

женням (рис. 27, б) використовується в нижньому діапазоні (98 МГц). Вихідна напруга у навантаженні ректени становить 2,38 В при вхідній потужності 10 дБм. ККД становить 70,28 %, 41,7 %, 33,37 % та 27,69 % на частотах 98 МГц, 0.9 ГГц, 1.8 ГГц та 2,4 ГГц, відповідно, при вхідній потужності 6 дБм.

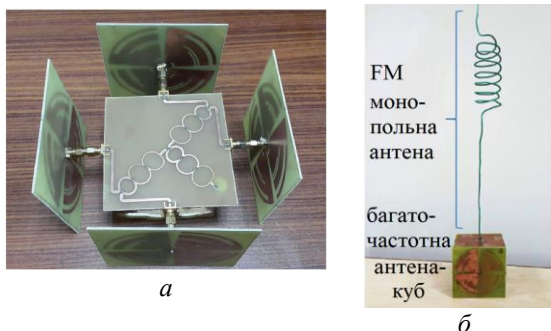


Рис. 27. Тривимірна ректена

У ректенах, які побудовані за схемами на рис. 2, а – г, кола узгодження та фільтрації вносять втрати (рис. 1), що призводить до зниження ККД й викликає труднощі при мініатюризації ректени [69, 70]. Усунути зазначені недоліки дозволяють ректени, які побудовані за схемами на рис. 2, е, ж. Смуговий фільтр можна інтегрувати у КУ [61] або у випромінювальну структуру [71 – 74] (випромінювач виконує функції фільтруючих та узгоджувальних кіл). Останній варіант кращий, тому що має низку переваг: невели-

кі габаритні розміри ректени; мінімальні втрати потужності, що дозволяє забезпечити на вході схеми випрямлення потужність приблизно рівну вхідній потужності; розширення робочої смуги ректени; придушення гармонік. Щоб забезпечити максимальну потужність у схемі випрямлення в робочій смузі частот повний вхідний опір випромінювача має бути комплексно спряженим з вхідним опором схеми випрямлення, тобто необхідно забезпечити слабку залежність модуля вхідного опору випромінювача від частоти. При безпосередньому з'єднанні випромінювача та схеми випрямлення головну роль у придушенні випромінювання на вищих гармоніках відіграє правильний вибір повного вхідного опору навантаження, функцію якого виконує вхідний опір випромінювача на частотах гармонік. Найкраща фільтрація гармонік досягається в тому випадку, коли на частотах гармонік активний опір випромінювача прагне до нуля. Отже, енергетичні параметри ректени значною мірою залежать від значення повного вхідного опору випромінювача. При розробці ректен за схемами рис. 2, е, ж необхідно одночасно вирішувати завдання проектування, моделювання та оптимізації випромінювача та кіл фільтрації. На рис. 28, 29 наведено приклади технічної реалізації широко-смугових ректен, які побудовані за схемою рис. 2, ж.

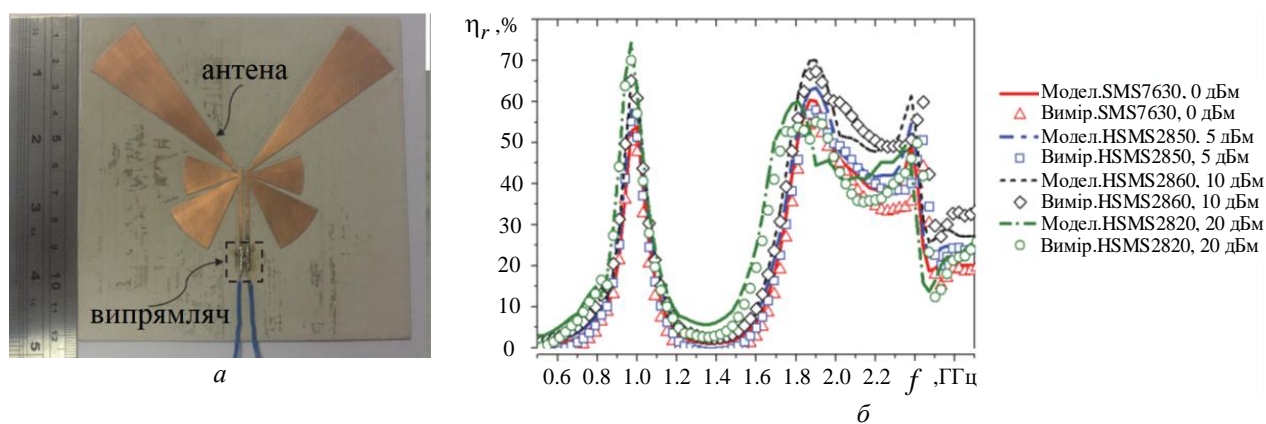


Рис. 28. Конструкція ректени (а) і результати теоретичних та експериментальних досліджень (б) [69]

Плечі диполя зі зміщенням від центру живленням мають форму типу краватка-метелик (рис. 28, а), що дозволяє розширити робочу смугу частот. Для забезпечення приймання ЕМ хвиль з довільною поляризацією диполі виконані однакового розміру та ортогональні один одному. Для управління імпедансом випромінювальної структури між двома диполями розміщено пару радіальних шлейфів. Дана конструкція ректени дозволяє зменшити вплив нелінійності випрямляча та забезпечити добре узгодження у широкому діапазоні значень імпедансу навантаження. Таким чином, ректена може ефективно працювати навіть при викорис-

танні різних типів діодів (рис. 28, б). Результати вимірювань показують, що ректена має високий ККД (більше 60 %) у двох широких діапазонах частот: 0,9 – 1,1 ГГц і 1,8 – 2,5 ГГц.

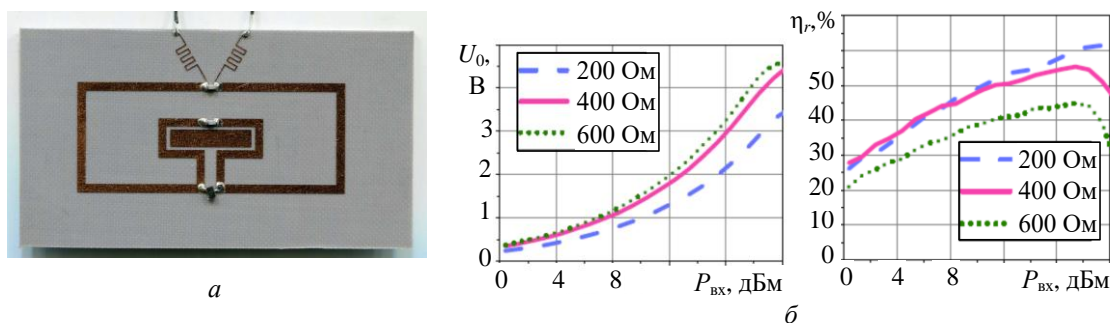


Рис. 29. Двосмугова ректена (а) та залежності постійної напруги U_0 та ККД від вхідної потужності на частоті 5,8 ГГц при різних опорах навантаження (б) [70]

На рис. 29, а дві меандровані лінії використовуються для виведення потужності постійного струму. Щоб уникнути взаємного зв'язку вони розташовані непаралельно одна одній.

2.6. Випрямні схеми ректен

Розглянемо деякі особливості проектування випрямлячів для ректен низької потужності. У загальному випадку вибір оптимальної конструкції випрямляча є нетривіальним завданням, оскільки він залежить від конкретної галузі застосування. Слід зазначити, що випрямляч, який ідеально підходить для одного сценарію застосування, може виявитися неефективним для іншого. За останні десятиліття було опубліковано багато досліджень на тему випрямних пристроїв для ректен систем збору ЕМ енергії. Рівень густини потоку потужності, що падає на ректену, зазвичай залишається невисоким. Це ускладнює розробку вискоелективних випрямлячів. Нелінійна поведінка випрямних елементів на високих частотах може викликати непередбачувані ємнісні та резистивні ефекти [1], змінюючи режим роботи кола узгодження та накопичувача енергії постійного струму. Тому важливе проведення оптимізації конструкції випрямляча, з урахуванням загальних рекомендацій щодо підвищення ККД, чутливості, зниження маси та габаритних розмірів, а також забезпечення надійної роботи. Ці аспекти слід адаптувати до конкретних вимог та умов експлуатації.

У ректенах для збирання та перетворення ЕМ енергії у постійний струм застосовуються напівпровідникові випрямні елементи. Діоди Шотткі широко використовуються через їхній низький поріг включення, меншу ємність переходу і стабільну роботу при різних температурах [75]. Низький поріг включення забезпечує ефективну роботу ректени при малих вхідних потужностях, а низька ємність переходу збільшує максимальну частоту, на якій ректена може працювати з заданими показниками якості. Дослідження [76] показують, що обернено-тунельні діоди можуть бути більш ефективними, ніж діоди Шотткі з точки зору ККД. Проте їхній високий імпеданс активної частини у діапазоні УВЧ ускладнює побудову КУ. Транзистори з діодним підключенням [77] мають напругу включення, близьку до порогової (менше 150 мВ), що дозволяє збирати енергію за дуже низької вхідної потужності. Транзистори з діодним підключенням дозволяють значно знизити площу випрямляча та зменшити вартість серійного виробництва ректен.

На рис. 30 подано кілька найбільш поширених схем випрямлячів. Для безпровідного енергопостачання малопотужних пристроїв серед різних схем випрямлячів ректен особливий інтерес становлять схеми, в яких за допомогою відповідного включення випрямних елементів і конденсаторів здійснюється не тільки випрямлення, але одночасно і множення випрямленої напруги (рис. 30, в – е) [78]. Робота помножувача напруги заснована на заряді та розряді конденсаторів через діоди. Схеми випрямлячів з множенням напруги дають можливість отримати на виході схеми напругу, помножену в кілька разів відносно вхідної. Коефіцієнт множення залежить від кількості ланок. Особливістю роботи випрямлячів з множенням напруги є використання властивостей конденсаторів накопичувати протягом деякого часу та

зберігати електричну енергію. Чим більша ємність конденсаторів, тим більше електричної енергії вони зберігають і тим вище при одному і тому ж навантаженні випрямлена напруга.

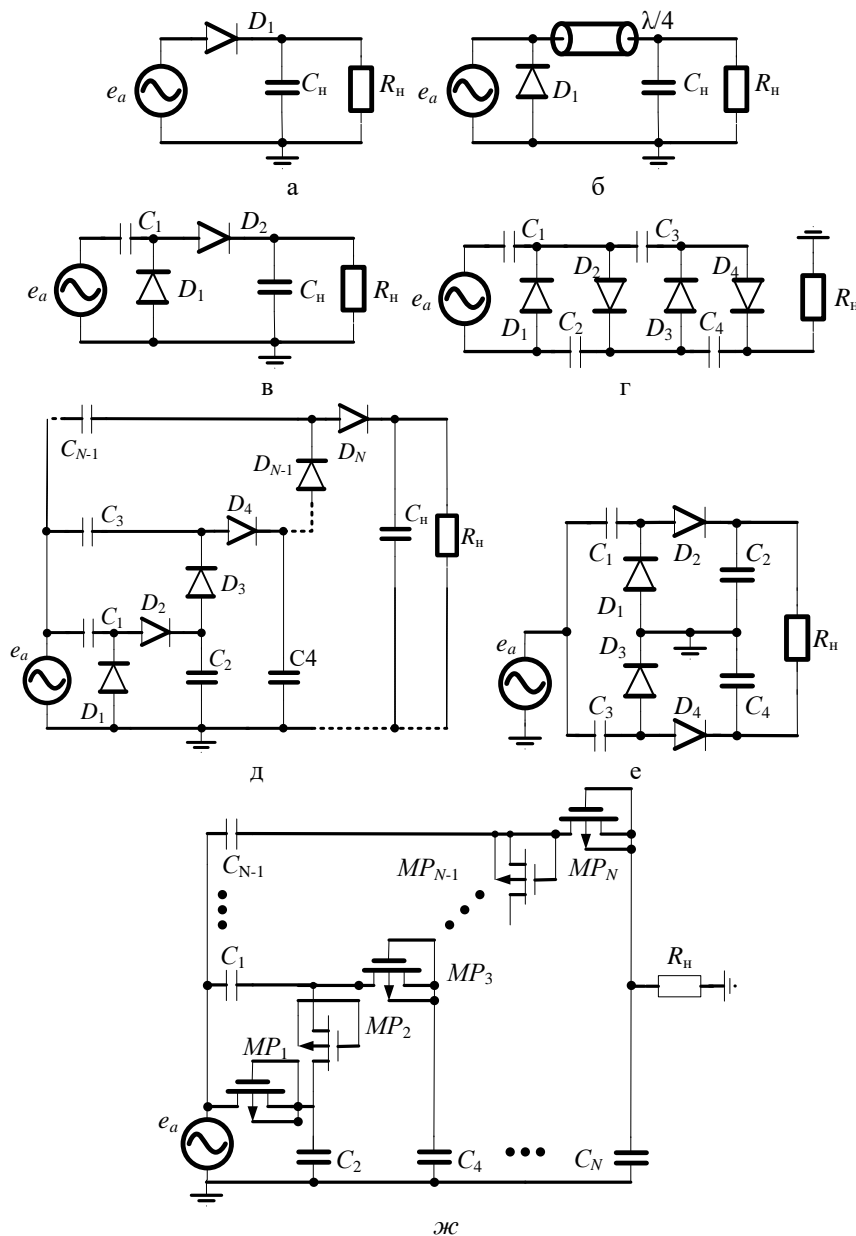


Рис. 30. а, б – однонапівперодні випрямлячі, в – однокаскадний помножувач напруги, г – помножувач Кокрофта–Уолтона–Грейнахера–Вілларда, д – помножувач Діксона, е – модифікований помножувач Кокрофта–Уолтона–Грейнахера, ж – транзисторний помножувач Діксона

При проектуванні помножувачів напруги необхідно підбирати оптимальну кількість ланок. Помножувачі з великою кількістю ланок забезпечують більший коефіцієнт множення напруги та знижують граничну напругу своєї першої ланки, що призводить до збільшення чутливості, проте при цьому зростають втрати потужності в елементах доданих ланок множення.

Помножувачі з меншою кількістю ланок мають менші втрати потужності, але при цьому мають вищий поріг включення при низькій вхідній потужності. Вибір оптимальної кількості ланок залежить від конкретних вимог застосунка.

В залежності від властивостей симетрії випрямлячі можна розділити на дві групи: з несиметричною топологією (наприклад, рис. 30, в) та симетричною (диференційною) топологією (рис. б).

Висновки

Розглянуто досягнення в галузі розробки ректен систем збору та перетворення енергії ЕМ полів,

що породжуються різними джерелами ЕМ енергії (РЕЗ різного класу та призначення), в енергію постійного струму. Ця технологія БПЕ [2] в даний час є однією з найбільш привабливих, враховуючи зростаючу щільність розташування РЕЗ різного призначення, особливо в мегаполісах. Лише у базі даних IEEE Xplore протягом останніх 17 років було виявлено понад 3800 публікацій за ключовими словами “RF Energy Harvesting”. Важливо відзначити, що ця стаття не претендує на вичерпний розгляд усіх аспектів технології збирання ЕМ енергії з довкілля. Цю роботу варто розглядати, перш за все, як визначення певної «відправної точки» для розробників при створенні ефективних ректен, які задовольняють сучасним вимогам практики. У статті наведено основні параметри ректен систем збору ЕМ енергії та типові

схеми їх побудови. Розглянуто різні варіанти конструктивної реалізації ректен та їх енергетичні характеристики.

Визначальними принципами при розробці ректен є досягнення високого ККД ректени, простоти конструкції, прийнятних масогабаритних показників, низької вартості, надійності і придатності для серійного виробництва. На енергетичні характеристики ректен впливає багато чинників, але є три взаємопов'язаних рівня вирішення проблеми створення якісних ректен. Перший рівень – поліпшення параметрів окремих випрямних елементів; другий рівень – оптимізація параметрів і характеристик окремих елементів ректени; третій рівень – оптимізація характеристик всієї ректени в цілому.

Загалом підхід до проектування високоефективних малопотужних ректен можна розділити на два основні аспекти.

Перший аспект полягає у розробці випромінювачів, які приймають енергію ЕМ хвиль з довільною поляризацією у широкій смузі частот або в кількох частотних діапазонах. Основні параметри випромінювачів, такі як форма ДС, коефіцієнт підсилення повинні забезпечувати необхідні характеристики ректени. У ректенах для збирання енергії зазвичай застосовують слабоспрямовані випромінювачі. Вони повинні мати високий ККД, високу механічну міцність, невеликі габаритні розміри і масу, також можливість функціонувати при коливаннях температури та атмосферного тиску. Крім зазначених загальних рекомендацій, вимоги до випромінювачів повинні враховувати специфіку їх роботи в ректені. Бажано, щоб у робочій смузі частот їх вхідний опір був близьким до величини оптимального навантаження випрямляча. У цьому випадку можливе підключення випромінювача до входу випрямляча або безпосередньо або із застосуванням простого КУ з невеликим числом елементів. Також, випромінювач і КУ повинні мати фільтруючі властивості для ослаблення рівня позасмугового випромінювання ректени.

Другий аспект полягає в розробці схем випрямлення з високим ККД перетворення енергії ЕМ полів у постійний струм і з високою чутливістю, а також оптимізації їх конструкції та топології, оптимального вибору механізмів випрямлення.

Проте з аналізу літературних джерел випливає, що в напрямку перетворення малопотужних ЕМ полів довільної структури все ж існує низка проблем. По-перше, є необхідність у розробці системного підходу, який дозволить розглядати систему збору електромагнітної енергії та перетворення її в корисну електричну енергію як єдину систему з врахуванням всіх нелінійних ефектів, що виникають у таких структурах. По-друге, ще недостатньо розвинені строгі теоретичні підходи до аналізу ректен, які збуджуються малопотужними нестационарними ЕМ полями довільної структури. Дослідження ректен при такому режимі збудження зараз проводяться при певних спрощеннях і припущеннях, які не дозволяють врахувати всю сукупність виникаючих в них нелінійних ефектів і приступити до серійного виробництва високоефективних ректен як енергосистем малопотужних пристроїв.

Список літератури

1. Шокало В.М., Лучанинов А.И., Рыбалко А.М., Грецких Д.В. Крупноапертурные антенны-выпрямители систем беспроводной передачи энергии микроволновым лучом. Харьков : Коллегиум, 2006. 308 с.
2. Алексеев В.О., Грецких Д.В., Гавва Д.С., Лихограй В.Г. Технологии беспроводной передачи энергии // Радиотехника. 2022. №211. С. 114–133.
3. Гавва Д.С., Грецких Д.В., Гомозов А.В., Пунин Д.В. Электродинамические устройства на основе радиоэлементов и материалов с нелинейными характеристиками // Технология приборостроения. 2018. № 2. С. 17–31.
4. Гавва Д.С., Грецких Д.В., Гомозов А.В., Преснякова А.Д. Электродинамические устройства с нелинейными характеристиками // Технология приборостроения. 2019. № 1. С. 20–35.
5. Wagih M., Weddell A.S., Beeby S. Rectennas for Radio-Frequency Energy Harvesting and Wireless Power Transfer: A Review of Antenna Design // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2020. Vol. 62, Is. 5. P. 95–107.
6. Adami S.-E., Proynov P., Geoffrey S. et al. A Flexible 2.45-GHz Power Harvesting Wristband With Net System Output From -24.3 dBm of RF Power // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2018. Vol. 66, No. 1.P. 380–395.
7. Zhang Y., Shen S., Chiu C.Y., Murch R. Hybrid RF-Solarenergy Harvesting Systems Utilizing Transparent Multiport Micromeshed Antennas // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019. Vol. 67, No. 11.P. 4534–4546.

8. Wagih M., Weddell A.S., Beeby S. Meshed High-Impedance Matching Network-Free Rectenna Optimized for Additive Manufacturing // *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*. 2020. Vol. 1. P. 615–626.
9. Li X., Xiao H., Zhang H. et al. A High Gain Flexible Receiving Antenna for Microwave Wireless Power Transmission. *Authorea*. 2022. P. 1–3.
10. Eid A., Hester J., Costantine J. et al. A Compact Source-Load Agnostic Flexible Rectenna Topology for IoT Devices // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2020. Vol. 68, Is. 4. P. 2621–2629.
11. Wagih M., Weddell A.S., Beeby S. Omnidirectional Dual-Polarized Low-Profile Textile Rectenna With Over 50% Efficiency for Sub- $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ Wearable Power Harvesting // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2021. Vol. 69, No. 5. P. 2522–2536.
12. Wagih M., Weddell A.S., Beeby S. High-Efficiency Sub-1 GHz Flexible Compact Rectenna Based on Parametric Antenna-Rectifier Co-Design // *Proceedings of 2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. 2020. P. 1–4.
13. Arrawatia M., Baghini M.S., Kumar G. Differential Microstrip Antenna for RF Energy Harvesting // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2015. Vol. 63, Is. 4. P. 1581–1588.
14. Wei L.Q., Yin Z.X. Differential Rectifier Using Resistance Compression Network for Improving Efficiency Over Extended Input Power Range // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2016. Vol. 64, No. 9. P. 2943–2954.
15. Hucheng S. An Enhanced Rectenna Using Differentially-Fed Rectifier for Wireless Power Transmission // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2015. Vol. 15. P. 32–35.
16. Zhang H., Zhong Z., Guo Y.-X., Wu W. Differentially-Fed Charge Pumping Rectifier Design with An Enhanced Efficiency for Ambient RF Energy Harvesting // *Proceedings of 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. 2017. P. 613–616.
17. Vyas R.J., Cook B.B., Kawahara Y., Tentzeris M.M. E-WEHP: A Batteryless Embedded Sensor-Platform Wirelessly Powered From Ambient Digital-TV Signals // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2013. Vol. 61, No. 6. P. 2491–2505.
18. Furuta T., Ito M., Nambo N. et al. The 500 MHz Band Low Power Rectenna for DTV in the Tokyo Area // *Proceedings of 2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*. 2012. P. 1–3.
19. Noguchi A., Arai H. Small Loop Rectenna for RF Energy Harvesting // *Proceedings of 2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC)*. 2013. P. 1–3.
20. John V., Chi-Chi C., Kyohei F. *Small Antennas: Miniaturization Techniques & Applications*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2009.
21. Ouedraogo R.O., Rothwell E.J., Diaz A.R., Fuchi K., Temme A. Miniaturization of Patch Antennas Using a Metamaterial-Inspired Technique // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2012. Vol. 60, No. 5. P. 2175–2182.
22. Ghosh B., Haque S.M., Mitra D. Miniaturization of Slot Antennas Using Slit and Strip Loading // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2011. Vol. 59, No. 10. P. 3922–3927.
23. Takacs A., Fonseca N.J.G., Aubert H. Height Reduction of the Axial-Mode Open-Ended Quadrifilar Helical Antenna // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2010. Vol. 9. P. 942–945.
24. Valteau J., Aubert H., Bellion A. et al. Resonant Metallic Rings With Irregular Contours for Spiral Antennas Miniaturization // *Proceedings of IEEE Conference Antenna Measurements & Applications (CAMA)*, Juan-les-Pins, France. 2014, P. 1–4.
25. Gaetano M. The Art of UHF RFID Antenna Design: Impedance-Matching and Size-Reduction Techniques // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2008. Vol. 50, Is. 1. P. 66–79.
26. Talla V., Kellogg B., Gollakota S., Smith J.R. Battery-Free Cellphone // *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.* 2017. Vol. 1, Is. 2. P. 1–20.
27. Ho D.K., Ngo V.D., Kharrat I. et al. A Novel Dual-Band Rectenna for Ambient RF Energy Harvesting at GSM 900 MHz and 1800 MHz // *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*. 2017. Vol. 2, Is. 3. P. 612–616.
28. Okba A., Takacs A., Aubert H. Compact Rectennas for Ultra-Low-Power Wireless Transmission Applications // *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* 2019. Vol. 67, No. 5. P. 1697–1707.
29. Zeng M., Andrenko A.S., Liu X. et al. A Compact Fractal Loop Rectenna for RF Energy Harvesting // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2017. Vol. 16. P. 2424–2427.
30. Shi Y., Jing J., Fan Y., Yang L., Wang M. Design of a Novel Compact and Efficient Rectenna for WiFi Energy Harvesting // *Prog. Electromagn. Res.* 2018. Vol. 83. P. 57–70.
31. Liu C., Guo Y.X., Sun H., Xiao S. Design and Safety Considerations of an Implantable Rectenna for Far-Field Wireless Power Transfer // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2014. Vol. 62, Is. 11. P. 5798–5806.
32. Gu X., Hemour S., Guo L., Wu K. Integrated Cooperative Ambient Power Harvester Collect in Ubiquitous Radio Frequency and Kinetic Energy // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2018. Vol. 66, Is. 9. P. 4178–4190.
33. Hosain M.K., Kouzani A.Z., Tye S.J. et al. Development of a Compact Rectenna for Wireless Powering of a Headmountable Deep Brain Stimulation Device // *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*. 2014. Vol. 2. P. 1–13.
34. Qudus A., Zahid S., Tahir F.A. et al. Dualband Compact Rectenna for UHF and ISM Wireless Power Transfer Systems // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2021. Vol. 69, Is. 4. P. 2392–2397.

35. Eid A., Hester J.G.D, Costantine J. et al. A Compact Source-Load Agnostic Flexible Rectenna Topology for IoT Devices // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2020. Vol. 68, Is. 4. P. 2621–2629.
36. Chuma E.L., Rodríguez L.D.L.T., Iano Y. et al. Compact Rectenna Based on a Fractal Geometry With a High Conversion Energy Efficiency Per Area // *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2018. Vol. 12. Is. 2. P. 173–178.
37. Shrestha S., Lee S.R., Choi D.Y. A New Fractal-Based Miniaturized Dual Band Patch Antenna for RF Energy Harvesting // *International Journal of Antennas and Propagation*. 2014. Vol. 2014. P. 1–9.
38. Bakogianni S., Koulouridis S. A Dual-Band Implantable Rectenna For Wireless Data and Power Support at Sub-GHz Region // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2019. Vol. 67. Is. 11. P. 6800–6810.
39. Cheng H.W., Yu T.C., Luo C.H. Direct Current Driving Impedance Matching Method for Rectenna Using Medical Implant Communication Service Band for Wireless Bcharging // *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2013. Vol. 7, Is. 4. P. 277–282.
40. Assimonis S.D., Fusco V., Georgiadis A., Samaras T. Efficient and Sensitive Electrically Small Rectenna for Ultra-Low Power RF Energy Harvesting // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8, Is. 1. P. 1–12.
41. Amer A.A.G., Sapuan S.Z., Nasimuddin N. et al. A Comprehensive Review of Metasurface Structures Suitable for RF Energy Harvesting // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 76433–76452.
42. Eteng A.A., Goh H.H., Alomainy S.-K.A.-R.A. A Review of Metasurfaces for Microwave Energy Transmission and Harvesting in Wireless Powered Networks // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 27518–27539.
43. Aldhaebi M.A., Almoneef T.S. Highly Efficient Planar Metasurface Rectenna // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 214019–214029.
44. Tang M.C., Wang H., Ziolkowski R.W. Design and Testing of Simple, Electrically Small, Low-Profile, Huygens Source Antennas With Broadside Radiation Performance // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2016. Vol. 64, Is. 11. P. 4607–4617.
45. Lin W., Ziolkowski R.W. High Performance Electrically Small Huygens Rectennas Enable Wirelessly Powered Internet of Things Sensing Applications: A Review // *Engineering*. 2022. Vol. 11. P. 42–59.
46. 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 : Колегіум, 2010. 435 с.
47. Lin W., Ziolkowski R.W., Huang J. Electrically Small, Low Profile, Highly Efficient, Huygens Dipole Rectennas For Wirelessly Powering Internet-of-Things (IoT) Devices // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2019. Vol. 67, Is. 6. P. 3670–3679.
48. Lin W., Ziolkowski R.W. Wirelessly Powered Light and Temperature Sensors Facilitated by Electrically Small Omnidirectional and Huygens Dipole Antennas // *Sensors*. 2019. Vol. 19, Is. 9.
49. Lin W., Ziolkowski R.W. Electrically Small Huygens Antenna-Based Fully Integrated Wireless Power Transfer and Communication System // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 39762–39769.
50. Ponnimbaduge P.T.D., Jayakody D.N.K., Sharma S.K. et al. Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT): Recent Advance and Future Challenges // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018. Vol. 20, Is. 1. P. 264–302.
51. Massa A., Oliveri G., Viani F., Rocca P. Array Designs for Long-Distance Wireless Power Transmission: State-of-the-Art and Innovative Solutions // *Proceedings of the IEEE*. 2013. Vol. 101, No 6. P. 1464–1481.
52. Shen S., Zhang Y., Chiu C.-Y., Murch R.A. Triple-Band High-Gain Multibeam Ambient RF Energy Harvesting System Utilizing Hybrid Combining // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020. Vol. 67, Is. 11. P. 9215–9226.
53. Li L., Zhang X., Song C. et al. Compact Dual-Band, Wide-Angle, Polarization-Angle-Independent Rectifying Metasurface for Ambient Energy Harvesting and Wireless Power Transfer // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2021. Vol. 69, No. 3. P. 1518–1528.
54. Kalaagi M., Seetharamdoo D. Enhancing the Power Level Harvested by Rectenna Systems Based on Focusing Metasurfaces for Ambient Environments // *Journal of Applied Physics*. 2022. Vol. 132, Is. 22. P. 1–8.
55. Song C., Huang Y., Zhou J. et al. A High-Efficiency Broadband Rectenna for Ambient Wireless Energy Harvesting // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2015. Vol. 63, No. 8. P. 3486–3495.
56. Pinuela M., Mitcheson P.D., Lucyszyn S. Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semiurban Environments // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2013. Vol. 61, No. 7. P. 2715–2726.
57. Lu P., Song C., Huang K.M. Ultra-Wideband Rectenna Using Complementary Resonant Structure for Microwave Power Transmission and Energy Harvesting // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2021. Vol. 69, No. 7. P. 3452–3462.
58. Nie M.-J., Yang X.-X., Tan G.-N., Han B. A Compact 2.45-GHz Broadband Rectenna Using Grounded Coplanar Waveguide // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2015. Vol. 14. P. 986–989.
59. Kuhn V., Lahuec C., Seguin F., Person C. A Multi-Band Stacked RF Energy Harvester With RF-to-DC Efficiency Upto 84% // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2015. Vol. 63, Is. 5. P. 1768–1778.
60. Song C., Huang Y., Carter P. et al. A Novel Six-band Dual CP Rectenna Using Improved Impedance Matching Technique for Ambient RF Energy Harvesting // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2016. Vol. 64, Is. 7. P. 3160–3171.
61. Karakaya E., Bagci F., Yilmaz A., Akaoglu B. Metamaterial-Based Four-Band Electromagnetic Energy Harvesting at Commonly Used GSM and Wi-Fi Frequencies // *Journal of Electronic Materials*. 2019. Vol. 48. P. 2307–2316.

62. Benayad A., Tellache M. A Compact Energy Harvesting Multiband Rectenna Based on Metamaterial Complementary Split Ring Resonator Antenna and Modified Hybrid Junction Ring Rectifier // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2019. Vol. 30, Is. 2. P. 1–11.
63. Wang M., Fan Y., Yang L. et al. Compact Dual-Band Rectenna for RF Energy Harvest Based on a Tree-Like Antenna // IET Microwaves, Antennas & Propag., 2019. Vol. 13, Is. 9. P. 1350–1357.
64. Shrestha S., Lee S.R., Choi D.-Y. A New Fractal-Based Miniaturized Dual Band Patch Antenna for Ration Energy Harvesting // International Journal of Antennas and Propagation. 2014. Vol. 8. P. 1–9.
65. Badamchi Z., Trinh N.D., Bois C., Djera T. Printed Fractal Folded Coplanar-Strips-Fed Array Rectenna for IoE Applications // Progress In Electromagnetics Research. 2022. Vol. 125. P. 161–177.
66. Estrada J.A., Kwiatkowski E., López-Yela A. et al. RF-Harvesting Tightly Coupled Rectenna Array Tee-Shirt With Greater Than Octave Bandwidth // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2020. Vol. 68, Is. 9. P. 3908–3919.
67. Khalid F., Saeed W., Shoaib N. et al. Quad-Band 3D Rectenna Array for Ambient RF Energy Harvesting // International Journal of Antennas and Propagation. 2020. Vol. 2020. P. 1–23.
68. Bui D.H.N., Vuong T.-P., Verdier J., Allard B., Benech P. Design and Measurement of 3D Flexible Antenna Diversity for Ambient RF Energy Scavenging in Indoor Scenarios // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 17033–17044.
69. Song C., Huang Y., Zhou J. et al. Matching Network Elimination in Broadband Rectennas for High-Efficiency Wireless Power Transfer and Energy Harvesting // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. Vol. 64, Is. 5. P. 3950–3961.
70. He Z., Lin H., Liu C. Codesign of a Schottky Diode's and Loop Antenna's Impedances for Dual-Band Wireless Power Transmission // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2020. Vol. 19, No. 10. P. 1813–1816.
71. Kuhn V., Lahuec C., Seguin F., Person C. A Multi-Band Stacked RF Energy Harvester With RF-to-DC Efficiency Upto 84 % // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2015. Vol. 63, Is. 5, P. 1768–1778.
72. Ma Z.K., Vandenbosch G.A.E. Wideband Harmonic Rejection Filter for Wireless Power Transfer // IEEE Transactions on Antennas Propagation. 2013. Vol. 62, No. 1. P. 371–377.
73. Chou J.-H., Lin D.-B., Weng K.-L., Li H.-J. All Polarization Receiving Rectenna With Harmonic Rejection Property for Wireless Power Transmission // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2014. Vol. 62, No. 10. P. 5242–5249.
74. Dong Y., Gao S., Luo Q. et al. Broadband Circularly Polarized Filtering Antennas // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 76302–76312.
75. Finkenzeller K. RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification. New York : Wiley, 2003.
76. Yao Y., Wu J., Shi Y., Dai F. A Fully Integrated 900-MHz Passive RFID Transponder Front End With Novel Zero-Threshold RF-DC Rectifier // IEEE Transaction on Industrial Electronics. 2009. Vol. 56, No. 7. P. 2317–2325.
77. Wang W., Wong H., Han Y. A High-Efficiency Full-Wave CMOS Rectifying Charge Pump for RF Energy Harvesting Applications // Microelectronics Journal. 2015. Vol. 46, Is. 12, Part B. P. 1447–1452.
78. Valenta C.R., Durgin G.D. Harvesting Wireless Power: Survey of Energy-Harvester Conversion Efficiency in Far-Field, Wireless Power Transfer Systems // IEEE Microwave Magazine. 2014. Vol. 15, Is. 4. P. 108–120.

Надійшла до редколегії 07.10.2023

Відомості про авторів:

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

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

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

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

Хань Іван Анатолійович – студент кафедри комп'ютерної радіоінженерії та систем технічного захисту інформації, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна, e-mail: ivan.khan@nure.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7866-8871>.