УДК 621.372
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/13

Шевцов К.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Живков О.П.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПРЯМОКУТНІ МІКРОСТРІЧКОВІ РЕЗОНАТОРИ ЯК ЕЛЕМЕНТ РЕКТЕН ТА ЇХ МЕТАМАТЕРІАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ

У статті розкрито сутність ректен ,або антенних систем з випрямленням, як високоефективних пристроїв для збору радіочастотної енергії (RF) та її перетворення на постійний струм. Визначено, що ці пристрої відіграють важливу роль у розвитку технологій бездротового живлення, особливо в умовах, де доступ до традиційних джерел енергії є обмеженим або уривчастим та з'ясовано, що ректени базуються на мікросмужкових антенах, які приймають електромагнітні хвилі на заданих частотах, а також на фільтрах, що забезпечують точне виділення необхідних сигналів.

У статті визначено, що одним з ключових компонентів ректен є мікросмужкові резонатори, які дозволяють ефективно працювати на потрібних частотах, мінімізуючи втрати та завади та продемонстровано Резонанс Фано, який виникає у таких резонаторах і забезпечує високу ефективність перетворення енергії завдяки своїм унікальним властивостям, що дозволяють зменшувати завади і підвищувати селективність сигналів.

Оскільки дослідження ректен є перспективним напрямом у сфері енергозбереження та бездротових технологій, у статті розкрито, як ці пристрої дозволяють збирати енергію з навколишнього середовища, наприклад, із мобільних мереж або сигналів Wi-Fi та продемонстровано їх застосування в таких галузях, як інтернет речей (IoT), сенсорні мережі та дистанційне живлення пристроїв. Особливу увагу приділено здатності ректен працювати в умовах низької інтенсивності сигналів, що робить їх незамінними у ситуаціях, де використання інших джерел живлення є неможливим.

У статті розкрито сучасні підходи до проектування ректен на основі мікросмужкових резонаторів, а також вплив резонансу Фано на характеристики фільтрів у таких пристроях. Зокрема, досліджується вплив геометрії резонаторів на роботу фільтрів та способи їх оптимізації для максимального збору енергії в конкретних умовах.

Ключові слова: *ректена, антена, фільтр, мікросмужкові резонатори, резонанс Фано, збирання енергії.*

Постановка проблеми. Сучасні системи бездротової передачі енергії та комунікаційні технології потребують високоефективних та надійних фільтрів, здатних селективно обробляти сигнали різних частот, а також забезпечувати ефективне збирання енергії. Мікросмужкові прямокутні резонатори мають значний потенціал для вирішення цих завдань, проте їхні резонансні властивості, зокрема феномен резонансу Фано, ще недостатньо вивчені у контексті практичного використання для підвищення ефективності фільтрації та збору енергії в ректенах і метаматеріалах. Проблема полягає у необхідності глибшого аналізу цих структур для розробки більш ефективних рішень у сфері бездротової передачі енергії та сенсорних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [5] описано конструкцію та властивості спрямованих фільтрів на основі кругових резонаторів і діелектричних резонаторів. Також розглядаються мікросмужкові прямокутні резонатори та їх використання для створення смугово-пропускних фільтрів направленої зони. Ректени на базі подібних пристроїв можуть мати кращу селективність частот за рахунок направленості. У статті [11] представлено розробку, моделювання, виготовлення та вимірювання компактної схеми збору енергії. Для цієї схеми збору енергії використовується квадратурний гібридний дільник через його високу ізоляцію та відсутність втрат. Він ефективно подає сигнал на мостовий випрямляч, поєднуючи сигнали, отримані від двох антен. Компонент мостового випрямляча забезпечує повнохвильове випрямлення сигналу від двожильного змінного струму. Згідно з тео-

ретичними та практичними результатами, схема збору енергії може працювати для застосувань у сенсорних мережах бездротових локальних мереж, що робить його актуальним для використання, у ролі формувача кругової поляризації в мікрохвильових антенах і ректенах, що дозволяє ректені ефективно працювати незалежно від орієнтації передавальної антени чи джерела сигналу. Це важливо для мобільних або непередбачувано рухомих об'єктів, де неможливо постійно підтримувати фіксовану орієнтацію антени.

Постановка завдання. Метою статті є огляд структури ректен та дослідженні та аналіз використання мікросмужкових прямокутних резонаторів як їх складової.

Виклад основного матеріалу. Ректени (rectenna – rectifying antenna) – це пристрої, що поєднують антену і випрямляч для перетворення радіочастотної енергії на постійний струм. В умовах частих відключень електроенергії в Україні ректени можуть бути застосовані для збору енергії з радіочастотних джерел, що дозволяє використовувати їх як додаткове або резервне джерело живлення для невеликих електронних пристроїв таких як датчики, трекери або радіомітки. Вони можуть бути розташовані поблизу джерел радіохвиль, наприклад, Wi-Fi або мобільних вишок.

У густонаселених районах з високою концентрацією радіосигналів (Wi-Fi, мобільні мережі, телевізійні станції) ректени можуть ефективно збирати енергію для живлення невеликих пристроїв, таких як датчики або системи безпеки. Хоча ректени поки що не здатні замінити основні джерела живлення через відносно низьку ефективність, вони можуть стати корисним додатковим компонентом для підтримання роботи малопотужних систем під час енергетичних криз.

Історія створення ректен охоплює кілька десятиліть, починаючи з фундаментальних досліджень електромагнітних хвиль і завершуючи сучасними інноваціями в галузі бездротової передачі енергії. Ректени є важливою частиною цієї еволюції, оскільки вони лежать в основі технологій, що можуть змінити майбутнє енергетики, зокрема в умовах переходу до бездротових систем.

Ранні дослідження та теоретичні основи

Історія ректен бере свій початок з робіт великих науковців, таких як Джеймс Клерк Максвелл, Генріх Герц і Нікола Тесла. Основи використання електромагнітних хвиль для передачі енергії були закладені ще в кінці XIX століття, коли Максвелл у 1865 році створив теорію електромагнітного поля [1]. Це відкриття стало основою для розуміння, як енергія може передаватися у вигляді хвиль через простір.

У 1888 році Генріх Герц експериментально підтвердив існування електромагнітних хвиль, що дозволило почати вивчення можливостей їх використання для передачі енергії на відстань [2]. Одним із перших, хто зацікавився цією темою, був Нікола Тесла. На рубежі XIX і XX століть він експериментував з бездротовою передачею електроенергії через свої знамениті «котушки Тесли», створюючи прототипи технологій, що використовують електромагнітні хвилі.

На той час ці експерименти не отримали широкого практичного застосування через низьку ефективність і відсутність технологій для збору енергії з радіохвиль. Проте саме ці ранні дослідження заклали теоретичні основи для створення ректен.

Поява концепції ректени

Ректени як технологія почали розвиватися у середині XX століття, коли з'явилися напівпровідникові діоди, здатні працювати на високих частотах. Одним із перших практичних застосувань ректен стало дослідження в області бездротової передачі енергії для супутників та космічних систем.

У 1960-х роках американський інженер Вільям Браун, працюючи в компанії Raytheon, вперше запропонував ідею використання мікрохвиль для бездротової передачі енергії на великі відстані. Його дослідження зосереджувались на передачі енергії через мікрохвилі до літальних апаратів і супутників [3]. У 1964 році Браун створив першу діючу ректену, яка використовувала антену для збору мікрохвильової енергії та випрямляч для її перетворення на постійний струм. Перший публічний демонстраційний проект Брауна показав, що можна передати енергію для живлення маленького безпілотного вертольота на відстані кількох метрів. Цей експеримент продемонстрував життєздатність ректен як технології для бездротової передачі енергії.

Розвиток у космічних технологіях

Протягом 1970-х і 1980-х років ректени почали активно розглядатися в космічних програмах. Ідея полягала в тому, щоб використовувати мікрохвильову передачу енергії для живлення супутників, що знаходяться на орбіті, або для передачі енергії з космічних сонячних станцій на Землю.

NASA та інші космічні агенції розпочали експерименти з концепцією «солярної енергії з космосу», де сонячні панелі на орбіті збирали б енергію і передавали її на Землю за допомогою мікрохвиль [4]. Ректени на Землі збирали б цю енергію і перетворювали її на електрику. Хоча ці

проекти не досягли широкого практичного впровадження, вони значно просунули розробку ректен та бездротових систем енергопередачі.

Використання ректен у сучасних технологіях

У 1990-х і 2000-х роках розробка ректен продовжувала розвиватися, але основна увага приділялася не космічним проектам, а земним застосуванням. Технології бездротової передачі енергії стали важливою темою для мобільних пристроїв, електронних датчиків і систем збору енергії з навколишнього середовища.

З розвитком Інтернету речей (IoT) ректени знайшли своє застосування в системах збирання енергії для живлення малопотужних датчиків і пристроїв. Сучасні ректени можуть збирати енергію з радіохвиль від мобільних мереж, Wi-Fi або телевізійних передавачів, що робить їх перспективними для бездротових мереж живлення. Одним з цікавих прикладів є проекти з бездротової зарядки мобільних пристроїв. Наприклад, компанії розробляють системи, що дозволяють заряджати телефони чи інші гаджети за допомогою ректен, використовуючи радіохвилі, що вже присутні в повсякденному середовищі.

Майбутнє ректен і бездротової передачі енергії

На сьогодні ректени продовжують бути важливою частиною досліджень у галузі енергетики. Вчені працюють над підвищенням ефективності ректен і розширенням спектру їх застосування. Мета полягає в тому, щоб створити системи, які зможуть збирати енергію з радіочастотних сигналів з високою ефективністю і на великих відстанях.

Однією з перспективних галузей є розвиток бездротових електростанцій, які можуть передавати енергію на далекі відстані без потреби в кабелях. Це може бути корисно не лише для зарядки мобільних пристроїв, але і для постачання енергії до віддалених районів або космічних апаратів. Крім того, ректени можуть відігравати важливу роль у розширенні відновлюваної енергетики. Наприклад, проекти з використання ректен для передачі енергії від сонячних батарей, розташованих на великих відстанях, є важливими кроками на шляху до сталого майбутнього.

Структура Ректени

Ректена складається з кількох основних компонентів, які дозволяють їй перетворювати радіочастотну (RF) енергію на електричну.

Антена (та схема узгодження). Основний елемент, який приймає радіочастотні сигнали. Антена може бути різних типів залежно від частоти, на якій працює ректена. Зазвичай використовуються дипольні антени або мікросмужкові антени, які можуть захоплювати радіохвилі від різних джерел, таких як мобільні мережі, Wi-Fi чи телевізійні передавачі.

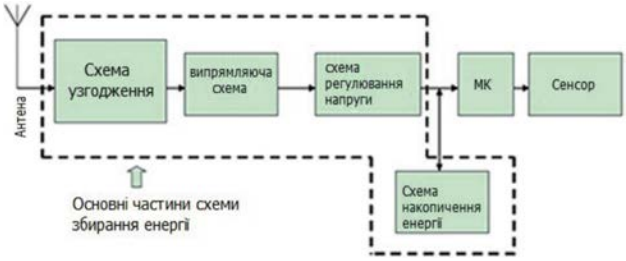


Рис. 1. Структура ректени з корисним навантаженням у вигляді мікроконтролеру та сенсору

Випрямляюча схема (діод). Основний компонент, що перетворює змінний струм, отриманий від антени, на постійний струм. Найчастіше використовуються високочастотні діоди (шотткідіоди), які мають низьке пряме падіння напруги і можуть працювати на високих частотах, характерних для радіочастотних сигналів.

Схема регулювання напруги. Цей компонент відсікає високочастотні складові сигналу після випрямлення і згладжує вихідний сигнал, забезпечуючи стабільний постійний струм.

Навантаження (акумулятор або інший пристрій). Енергія, перетворена з радіочастотного сигналу, подається на навантаження – це може бути або резистор для тестування, або реальний пристрій, який використовує отриману електричну енергію, наприклад, датчик, мікроконтролер або акумулятор для заряджання.

Для того щоб ректена могла ефективно приймати та збирати енергію в більш широкому частотному діапазоні, необхідно розширити її смугу пропускання. Це можливо досягти за рахунок використання ортогональних типів коливань, які дозволяють пристрою функціонувати на різних частотах одночасно, що значно підвищує її ефективність. Ортогональні типи коливань забезпечують більшу гнучкість і адаптивність системи до різних умов прийому сигналу. Такі коливання досліджувалися нами раніше під час вивчення властивостей прямокутних мікросмужкових резонаторів. Виявилося, що ці резонатори здатні демонструвати резонанс Фано, що також сприяє розширенню смуги пропускання та покращенню характеристик пристрою. Завдяки цим властивостям прямокутні мікросмужкові резонатори стають перспективним компонентом для використання в ректенах, що збирають енергію з радіочастотних випромінювань у широкому спектрі частот.

Мікросмужкові резонатори стали важливим елементом у розвитку ректен та інших бездротових технологій, оскільки вони дозволяють більш ефективно збирати радіочастотну енергію з різних джерел. Це робить їх перспективними для широкого спектра застосувань, від живлення малопотужних пристроїв до сенсорних систем і космічних програм. Однак останні дослідження мікросмужкових структур показують, що ці технології можуть мати ще більш значні перспективи. Зокрема, це стосується використання резонансних властивостей мікросмужкових резонаторів у різних галузях електроніки, включаючи комунікаційні системи, антенні технології та сенсори. Резонанс Фано, який відіграє ключову роль у сучасних розробках, дозволяє створювати структури з високими показниками ефективності та чутливості.

У [5, с. 281–283] розглядаються мікросмужкові прямокутні резонатори та їх використання для створення смугово-пропускних фільтрів направленої зони. Ректени на базі подібних пристроїв можуть мати кращу селективність частот за рахунок направленості. Раніше такі резонатори широко використовувалися у вигляді хвилеводних структур [6, 7]. При заміні хвилеводних резонаторних структур на мікросмужкові, слід враховувати той факт, що в області мікросмужкових ліній існують парні та непарні моди з різними хвильовими параметрами [8, с. 55–57].

Розглянемо використання прямокутного мікросмужкового резонатора у вигляді фільтра з прорізами (рис. 1 а, б)). Залежно від співвідношення сторін резонатора (довжина і ширина) при однаковому периметрі коефіцієнт передачі фільтра може приймати форму аномально крутої резонансної характеристики типу резонансу Фано (помаранчева крива на нижньому графіку Рис. 1 в) [9, с. 703–771], або у вигляді кривої з двома горбами (синя крива на нижньому графіку Рис. 1 г). На верхньому графіку рис. 1 а) показано фазові (штрихові криві) та часові (GD – суцільні криві) криві коефіцієнтів передачі S21 (помаранчева та сині криві) при дуже незначній зміні (0,01 мм) зазору між резонатором та лінією під час «перескакування» через резонанс Фано – перехід від області аномальних до області нормальних фазових характеристик [10, с. 278–298]. Видно, що фазова характеристика S21 поблизу резонансу Фано може мати як нормальний, так і аномальний характер, тому її частотна похідна, GD, може мати як додатні, так і від'ємні значення в області резонансу.

На рис. 2 г) показані амплітудні (нижній графік) та частотні характеристики (верхній графік) коефіцієнтів передачі фільтра з прорізами для різних співвідношень довжин сторін резонаторів (при однаковому периметрі). Характеристики, представлені помаранчевою кривою, відповідають виродженим коливанням (резонанс Фано, структура на рис. 2 а), а сині криві демонструють режим «усунення виродження» (структура на рис. 2 б). Як видно, фільтр із прорізами на основі мікросмужкового прямокутного резонатора може

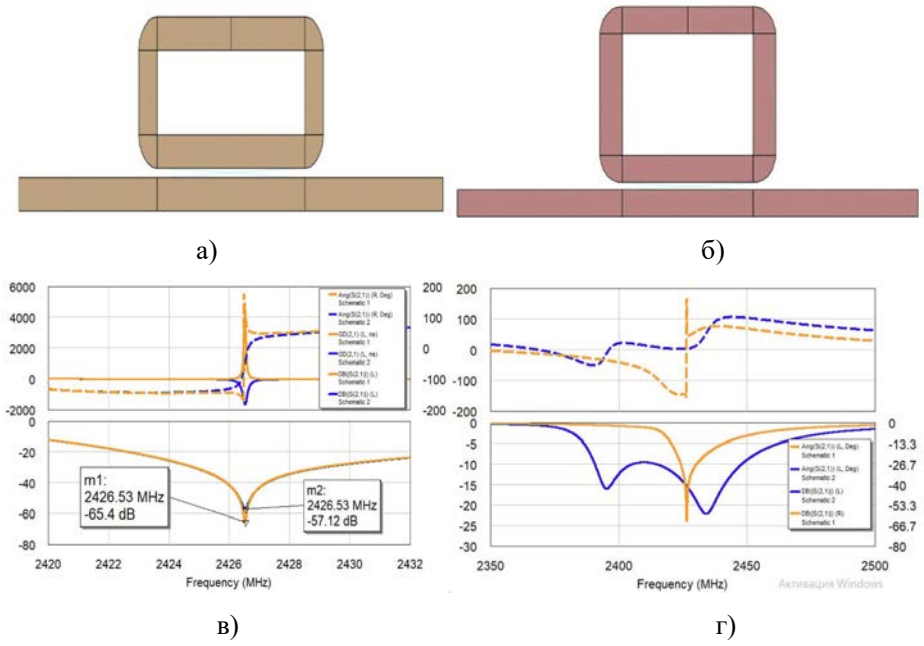


Рис. 2. а) та б) – прямокутні резонатори з однаковим периметром і різними співвідношеннями довжини та ширини; в) – г) – амплітудні (нижні графіки), частотні та часові (верхні графіки) характеристики резонаторів із різними співвідношеннями довжини та ширини

забезпечувати як дуже високе затухання у вузькому діапазоні частот, так і дещо менше затухання в порівняно широкому діапазоні частот, оскільки його характеристика фактично відповідає характеристиці двохрезонаторного фільтра (кожен тип коливання відповідає одному «резонатору»). Типовим прикладом ректени є ректена з використанням двох патч антен та квадратурного гібридного спрямовувача [11] що теж має метаматеріальні властивості

Мікросмужкові прямокутні структури також широко використовуються у вигляді квадратурного гібридного спрямовувача, наприклад, для формування кругової поляризації в мікрохвильових антенах і ректенах [12]. У цьому варіанті, коли мікросмужкова структура безпосередньо під'єднана до лінії передачі, її можна вважати «щільно зв'язаним» резонатором.

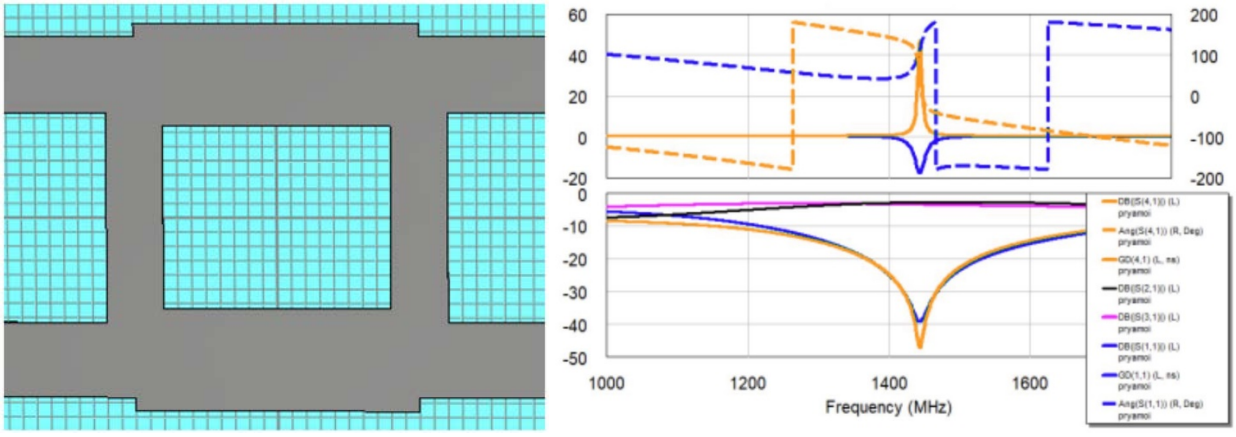
Для забезпечення фазового зсуву на 90° між другим і третім виходами (умова для формування кругової поляризації) і поділу вхідної потужності навпіл, прямокутник має бути у формі квадрата (рис. 3 а). На рис. 3 б) представлені амплітудні (нижній графік), фазові (штрихові криві) і часові (суцільні криві) характеристики (верхній графік) квадратурного гібридного спрямовувача, які демонструють його «метаматеріальні» властивості.

Коефіцієнти передачі S41 (помаранчева крива) та коефіцієнти відбиття S11 (синя крива) мають резонансний характер (тип інтерференції резонансу Фано). Це підтверджується їхніми фазовими та часовими характеристиками, причому S41 характеризується аномальною фазовою характеристикою і, як наслідок, позитивним значенням GD.

Ми активно працюємо над модернізацією ректен, здійснюючи перехід від патч-антен до більш ефективних тривимірних антен, побудованих на основі діелектричних резонаторів. Ця нова архітектура дозволяє значно підвищити ефективність збору енергії завдяки покращеній продуктивності антенних систем у різних частотних діапазонах. Дослідження спрямовані на оптимізацію параметрів діелектричних резонаторів для досягнення максимальних показників ефективності та надійності роботи ректен в умовах складних електромагнітних середовищ. Ці роботи проводяться в рамках проекту НАТО, метою якого є розвиток передових технологій для збору енергії та підвищення ефективності бездротових систем живлення. [13, с. 75–77]

Висновки. Ректени є важливою складовою сучасних технологій бездротової передачі енергії, що пройшли значний еволюційний шлях від теоретичних досліджень Максвелла та Тесли до практичних застосувань у мікрохвильовій передачі енергії та сучасних телекомунікаційних системах. Спочатку засновані на хвилеводних структурах, ректени згодом перейшли на мікросмужкові технології, що дозволило суттєво розширити їхнє застосування завдяки компактності та ефективності. Унікальні резонансні характеристики прямокутних мікросмужкових резонаторів, подібні до резонансу Фано в метаматеріальних комірках, спричинені інтерференційними явищами в цих структурах і тому, за певних параметрів, можуть демонструвати характеристики, притаманні метаматеріальним коміркам – аномальну дисперсію та великі позитивні значення GD.

Подяка. Робота проведена при підтримці SSF Project 2022-03-18 UKR22-0018 "THz-metamaterial for communication and sensing" та NATO project SPS G6002 – "3D Metamaterials for Energy Harvesting and Electromagnetic Sensing".



а) б)

Рис. 3. а) мікросмужковий квадратурний гібридний спрямовувач; б) амплітудні (нижній графік), часові (суцільні криві) і частотні (штрихові криві) характеристики на верхньому графіку, помаранчеві криві – характеристики S41, сині криві – характеристики S11

Список літератури:

1. Максвелл Дж. К. Теорія електромагнітного поля. Кембридж, 1865.
2. Герц Г. Електромагнітні хвилі: Експериментальні дослідження. Лейпциг, 1888.
3. Brown W.C. The History of Power Transmission by Radio Waves. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1984.
4. Brown W.C. Microwave Transmission of Power for Space Solar Power Satellites. Journal of Microwave Power. 1973.
5. Kamarali R. V., Zhivkov O. P., Shevtsov K. O., Krylach O. F., Stepanenko V. M. Microwave Directional Filters Proceedings of the International Scientific Conference "MODERN CHALLENGES IN TELECOMMUNICATIONS". 2023. P. 281–283.
6. Matthaei G. L., Young L., Jones E. M. T. Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures. New York: McGraw-Hill Book Co. Inc., 1964.
7. Coale F. S. A Traveling-Wave Directional Filter. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1956. T. 4, № 4. P. 256–260. doi:10.1109/tmtt.1956.1125073.
8. Chen W. H. Even and Odd Mode Impedance of Coupled Pairs of Microstrip Lines (Correspondence). IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1970. T. 18, № 1. P. 55–57. doi:10.1109/TMTT.1970.1127138.
9. Limonov M. F. Fano resonance for applications. Adv. Opt. Photon. 2021. T. 13. P. 703–771. https://doi.org/10.1364/AOP.420731.
10. Ilchenko M., Zhivkov A. Bridge equivalent circuits for microwave filters and Fano resonance. Proceedings of the UkrMiCo Conference. March 2019. P. 278–298.
11. Agwil R. O., Benchikh S., Djillali H., Tatu S. O. Antenna rectifier using quadrature hybrid coupler for power-harvesting applications. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2020. DOI: 10.1002/mmce.22279
12. Agwil R. O., Benchikh S., Djillali H., Tatu S. O. Antenna rectifier using quadrature hybrid coupler for power-harvesting applications. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2020. e22279. doi:10.1002/mmce.22279.
13. Galitskiy I., Kamarali R., Shevtsov K., Kirilyuk V microstrip 4-resonator filters with attenuation poles. Proceedings of the International Scientific Conference "MODERN CHALLENGES IN TELECOMMUNICATIONS". 2023. P. 75–77.

Shevtsov K.O., Zhivkov O.P. RECTANGULAR MICROSTRIP RESONATORS AS A RECTENNA ELEMENT AND THEIR METAMATERIAL PROPERTIES

The article reveals the essence of rectennas, or rectifying antenna systems, as highly efficient devices for collecting radio frequency (RF) energy and converting it into direct current. It is established that these devices play a significant role in the development of wireless power technologies, especially in environments where access to traditional energy sources is limited or intermittent. Rectennas are based on microstrip antennas that receive electromagnetic waves at specified frequencies, as well as filters that ensure precise extraction of the necessary signals.

The article identifies that one of the key components of rectennas is microstrip resonators, which allow efficient operation at the required frequencies, minimizing losses and interference. The phenomenon of Fano resonance, which occurs in such resonators, is demonstrated to provide high energy conversion efficiency due to its unique properties, enabling reduced interference and enhanced signal selectivity.

Since research on rectennas is a promising area in the field of energy conservation and wireless technologies, the article explores how these devices enable energy harvesting from the surrounding environment, such as from mobile networks or Wi-Fi signals. Their applications are demonstrated in areas such as the Internet of Things (IoT), sensor networks, and remote device powering. Special attention is given to the ability of rectennas to operate in low-signal-intensity conditions, making them indispensable in situations where the use of other power sources is impossible.

The article discusses modern approaches to designing rectennas based on microstrip resonators, as well as the impact of Fano resonance on filter characteristics in such devices. In particular, the influence of resonator geometry on filter performance is studied, along with optimization methods for maximizing energy collection under specific conditions.

Key words: *Rectenna, Antenna, Filter, microstrip resonators, Fano resonance, energy harvesting.*