

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

Шаміль Фадель Альван Аль-Самарі

УДК: 621.396.677.494:537.533.3

**РАДІОТЕХНІЧНА СИСТЕМА БЕСПРОВОДОВОЇ ПЕРЕДАЧІ
ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ СФОКУСОВАНОЇ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ АНТЕНИ**

05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук**

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, старший науковий співробітник.

ГОМОЗОВ АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ, начальник Сертифікаційного центру ракетно-космічної техніки Харківського представництва генерального замовника-Державного космічного агентства України (філія №3).

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор ГОРОБЕЦЬ МИКОЛА МИКОЛАЙОВИЧ, завідувач кафедри прикладної електродинаміки Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна; кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,

БОГОМ'Я ВОЛОДИМИР ІВАНОВИЧ, начальник відділу редакційно-видавничого та технічних засобів навчання Київської державної академії водного транспорту ім. гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного.

Захист відбудеться “10” грудня 2013 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 в Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: проспект Леніна, 14, м. Харків, 61166.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: проспект Леніна, 14, м. Харків, 61166.

Автореферат розіслано “8” листопада 2013 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 65.052.03



В.М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. З початку 60-х років ХХ століття зі створенням потужних генераторів надвисоких частот (НВЧ) почався новий виток інтересу до систем безпроводової передачі енергії (БПЕ) мікрохвильовим лучом. Теоретичні та експериментальні дослідження зі змінним успіхом продовжуються до дійсного часу в основних економічно розвинутих країнах світу. Обумовлено це тим, що розвиток промисловості наводить до значного збільшення споживання основних земних джерел енергії та загострюють необхідність пошуку альтернативних джерел енергії. Крім того, є необхідність забезпечення енергією різних важкодоступних об'єктів. До них можуть відноситись об'єкти, розташовані високо у горах, на островах морів та великих озер, а також в інших місцях, до яких з технічних, економічних та інших причин створення повітряних, надводних, підземних і підводних ліній передачі електроенергії неможливо або недоцільно.

У відомих наукових працях розглянуті системи БПЕ, в яких антена передавальної підсистеми являє собою однопозиційну фазовану антенну решітку (ФАР) з традиційним просторово-фазовим (ПФ) способом фокусування електромагнітного випромінювання (ЕМВ), а одношарова ректена приймальної підсистеми розташовується у першій половині зони Френеля передавальної ФАР. Фокусування ЕМВ здійснюється в точці розташування ректени та дозволяє збільшити щільність потоку потужності у порівнянні з передаванням ЕМВ без фокусування, що дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії (ККД) системи БПЕ у цілому. При цьому фокусування ЕМВ можливо тільки в першій половині зони Френеля, а тривалість сфокусованого просторово-часового імпульсу (ПЧІ) вдовж траси розповсюдження ЕМВ збільшується зі збільшенням відстані від передавальної ФАР до обраної у просторі точки фокусування ЕМВ. Таким чином, використання традиційного ПФ методу фокусування ЕМВ накладає обмеження на дальність передавання сфокусованої енергії у зв'язку з залежністю протяжності зони Френеля від геометричних розмірів ФАР. Для збільшення дальності до точки фокусування необхідно збільшення розмірів ФАР, що відповідно приводить до збільшення вартості, складності технічної реалізації системи БПЕ та неможливості створення мобільних систем БПЕ з ФАР великого розміру. Крім того, для збільшення потужності енергії, що передається, необхідно випромінювати потужний НВЧ сигнал, що приводить до збільшення розмірів зони безпеки для населення та обслуговуючого персоналу на передавальній підсистемі БПЕ.

За останні два десятиліття розроблені й опубліковані різні методи фокусування ЕМВ з комбінованими способами управління сигналами випромінювачів. При використанні багатоступеневих методів фокусування можна отримати сфокусовані ПЧІ із заданою тривалістю вздовж траси розповсюдження ЕМВ, яка не залежить від відстані до точки фокусування, що дозволить здійснювати фокусування ЕМВ в малій області простору - безпосередньо на ректені. Крім того, застосування в передавальній підсистемі сфокусованої багатопозиційної антени, дозволить збільшити еквівалентну базу антени та тим самим збільшити протяжність зони Френеля, де досягається найбільший вигравш у величині густини потоку потужності, порівняно з випадком звичайного синфазного випромінювання в зоні

Френеля. Під **сфокусованою багатопозиційною антеною** надалі будемо розуміти **багатопозиційну систему випромінювачів (БСВ) з фокусуванням ЕМІ**, яка представляє собою систему, що об'єднує окремі джерела випромінювання. Застосування в якості антени системи БПЕ - БСВ, дозволить отримати необхідне значення щільності потоку потужності ЕМВ в точці фокусування, при відносно невеликих відстанях до зони біологічної безпеки навколо кожного окремого джерела випромінювання в БСВ. Також, поряд з системами БПЕ між наземними об'єктами, можливо створення перспективних систем БПЕ низькоорбітальних космічних апаратів (КА) для їх аварійного енергопостачання та додаткового енергозабезпечення спільно зі штатною підсистемою енергозабезпечення (ПСЕЗ) КА. Більшість аварійних ситуацій, які виникали за останні 10 років при льотній експлуатації українських і російських КА призводило до нештатної роботи ПСЕЗ КА. Це полягало в повному або частковому відсутності заряду хімічної батареї (БХ) КА від сонячної батареї (БС), що призводило до неможливості управління КА наземними засобами, а в окремих випадках до його втрати.

Тому є актуальною тема дисертаційних досліджень, які направлені на дослідження доцільних принципів роботи систем БПЕ до важкодоступних наземних об'єктів та низькоорбітальних КА. Для таких систем БПЕ в відомих роботах не розглядалися доцільні принципи їх роботи, способи фокусування ЕМВ, вимоги до структури сигналів, варіантів побудови, забезпечення біологічної безпеки операторів та населення. Метою цієї дисертаційної роботи є усунення цих пробілів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертації пов'язані з виконанням планової держбюджетної НДР (шифр «Технологія-П», реєстраційний номер № ДР 0112U000207), яка виконувалась у Державному підприємстві науково-дослідний технологічний інститут приладобудування (м. Харків) за Держконтрактом №5-10/13 від 03.06.2013 року в рамках Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2013-2018 роки за темою «Технологічне забезпечення створення ракетно-космічної техніки. Створення перспективних технологій виготовлення приладів». **Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є дослідження можливостей створення і оцінка варіантів технічної реалізації радіотехнічних систем БПЕ до важкодоступних об'єктів на дальності прямої видимості на основі сфокусованої багатопозиційної антени з односходовим дискретним (ОСД) V-подібним фокусуванням сигналів.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі сформульовані й вирішені наступні основні задачі:

1. Проведено теоретичне обґрунтування вибору методу фокусування ЕМІ для розробки системи БПЕ мікрохвильовим лучом.

2. Проведено обґрунтування структури та особливостей вимог до ПЧІ для використання їх у передавальній підсистемі БПЕ мікрохвильовим лучом при обраному методі фокусування ЕМВ.

3. Проведено обґрунтування принципів, розробка структурно-алгоритмічних варіантів технічної реалізації систем БПЕ мікрохвильовим лучом до важкодоступних об'єктів на дальності прямої видимості на основі ректен і БСВ з

фокусуванням ЕМВ, запропоновано рекомендації для альтернативного отримання додаткової енергії низькоорбітальних КА за допомогою перспективних систем БПЭ.

4. Проведено математичне моделювання поля ЕМВ для запропонованих систем БПЕ до наземних важкодоступних об'єктів.

5. Розроблено конструкцію випромінюючої структури та проведено розрахунки параметрів ПВЕ і ректени для запропонованих систем БПЕ.

6. Проведено оцінку продуктивності, зон біологічної безпеки, впливу електричних і конструктивних параметрів запропонованих варіантів технічної реалізації систем БПЕ для наземних важкодоступних об'єктів.

Об'єкт дослідження – процес безпроводової передачі енергії НВЧ лучом.

Предмет дослідження – методика підвищення ефективності систем БПЕ до важкодоступних об'єктів на дальності прямої видимості за рахунок застосування МСВ з фокусуванням ЕМВ і двошарових ректен.

Методи дослідження. Теоретичною базою для вирішення сформульованого завдання є:

- методи геометричної оптики та апертурний метод розрахунку характеристик спрямованості випромінювальних антенних систем для оцінки і аналізу просторово-часових (ПВ) і енергетичних характеристик сфокусованого ЕМВ, при вибраному управлінні сигналами, що випромінюють в передавальних каналах ФАР;

- методи статистичної радіотехніки та статистичної теорії антен при розробці вимог до дискретності і точності параметрів, запропонованих законів управління сигналами, що випромінюються;

- методи теорії антен з нелінійними елементами при виборі конструкції ПВЕ і оцінці характеристик ректен.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше розроблено нові концепції побудови систем БПЕ до важкодоступних об'єктів що відрізняються використанням передавальної сфокусованої багатопозиційної антени, у вигляді БСВ з фокусуванням ЕМВ. Збільшення еквівалентної бази антени передавальної підсистеми БПЕ дає можливість підвищити коефіцієнт корисної дії ректен приймальної підсистеми БПЕ.

2. Вперше розроблено методику розрахунку основних параметрів та структури послідовності сфокусованих ПЧІ для систем БПЕ, що відрізняються використанням БСВ з односходовим дискретним (ОСД) V-подібним фокусуванням ЕМВ. Це дозволяє отримати оптимальний режим передавання енергії та виключити можливість функціонального ураження чи придушення (ФУП) приймально-випрямляючих елементів (ПВЕ) ректени та радіоелектронних засобів (РЕЗ) споживачів енергії на приймальній підсистемі.

3. Отримано подальший розвиток методів підвищення надійності ректен шляхом застосування конструкції ПВЕ, що дозволяє зменшити вплив виходу зі строю випрямляючих діодів на ефективність перетворювання ректеною ЕМВ у постійний струм.

4. Отримано подальший розвиток методів підвищення значення питомої потужності постійного струму, що знімається з одиниці площі апертури ректени, за

рахунок застосування двошарової конструкції ректени з ПВЕ на ортогональних поляризаціях. Це дозволяє зменшити масогабаритні характеристики ректени.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

1. Запропоновані варіанти технічної реалізації систем БПЕ до важкодоступних об'єктів на дальності прямого бачення.

2. Обґрунтовано вимоги до структури та параметрів сигналів, що випромінюються передавальною підсистемою БПЕ.

3. За допомогою математичного моделювання отримані просторово-часові характеристики поля випромінювання в області точки фокусування, яка розташована на ректені приймальної підсистеми БПЕ.

4. Обґрунтовані вимоги до геометричних розмірів апертури БСВ та ректени для запропонованих варіантів систем БПЕ до наземних важкодоступних об'єктів.

5. Проведено розрахунок ККД ректен, що розроблені для запропонованих систем БПЕ до наземних важкодоступних об'єктів.

6. Проведено розрахунок продуктивності та зон безпеки, шляхом математичного моделювання проведена оцінка впливу електричних і конструктивних параметрів для запропонованих варіантів технічної реалізації систем БПЕ до наземних важкодоступних об'єктів.

7. Запропоновано рекомендації щодо використання перспективних систем БПЕ КА для аварійного і додаткового енергопостачання низькоорбітальних КА шляхом удосконалення існуючих їх ПСЕЗ за рахунок розміщення на зворотній стороні панелей БС КА ректен приймальної підсистеми БПЭ КА.

Частина результатів досліджень реалізовані в Державному підприємстві науково-дослідний технологічний інститут приладобудування при виконанні НДР «Технологія-П», що підтверджено відповідним актом впровадження.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є результатом наукових досліджень автора. Особистий вклад здобувача у роботах, які виконані в співавторстві полягають у наступному:

- у роботах [1, 2, 5, 7-9] – запропоновані варіанти технічної реалізації систем БПЕ до важкодоступних об'єктів на дальності прямої видимості, обґрунтовані вимоги до структури та параметрів сигналів, що випромінюються передавальною підсистемою БПЕ та оцінені продуктивність і зони безпеки для БПЕ, що запропоновані;

- у роботі [3] – надані практичні рекомендації щодо вибору випромінюючих структур и випрямляючих діодів приймально-випрямляючих елементів ректен, розглянуті способи з поліпшення їх параметрів;

- у роботі [4] – проведено розрахунки потенційно можливого значення щільності потоку потужності від джерела випромінювання системи БПЕ, яка запропонована, на ректені низькоорбітального космічного апарату;

- у роботі [6] – запропоновано та проведено аналіз шляхів технічної реалізації варіанту системи БПЕ на основі багатопозиційної системи випромінювачів з фокусуванням ЕМВ (сфокусованої багатопозиційної антенної системи) у якості передавальної підсистеми БПЕ, для підвищення енергопостачання низькоорбітальних малогабаритних космічних апаратів;

- у роботі [10] – оцінено вплив електричних та конструктивних параметрів системи БПЕ на основі сфокусованої багатопозиційної антенної системи на характеристики поля випромінювання в області точки фокусування;

- у роботі [11] – проведено аналітичний огляд літературних джерел з сучасних тенденцій розвитку наноректен;

- у роботі [12, 14] – проведено оцінку потенційних характеристик приймально-випрямляючих елементів та їх розрахунків на частотах гармонік

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, які отримані під час виконання дисертаційної роботи, були представлені 1 пленарним та 4 секційними докладами на 5 міжнародних науково-технічних конференціях:

- VIII International conference on antenna theory and techniques (ICATT'11, Kyiv, Ukraine, 20-23 September, 2011);

- 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2011, Харьков, 18-21 октября 2011);

- пленарный доклад на XI International Conference “Modern problems of radio engineering telecommunications and computer science” (TCSET'2012, Lviv-Slavske, Ukraine, 21-24 February, 2012);

- 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и информационные технологии» (КрыМиКо, 2012, 10-14 сентября 2012 г. Севастополь);

- IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'13, Odessa, Ukraine, 16-20 September, 2013).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи відображені у 14 наукових роботах: 9 статей у наукових фахових виданнях (з яких 1 – у закордонному фаховому журналі, 1 – написана особисто) і апробовано на міжнародних конференціях та форумах у 5 доповідях, з яких 1 доповідь – на пленарному засіданні), що опубліковані в наукових працях конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Обсяг дисертації становить 160 сторінок машинописного тексту, 41 рисунок на 17 сторінках, 10 таблиць, список використаних джерел – 103 найменувань на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** на основі аналізу особливостей предметної області дослідження і порівняльного огляду відомих публікацій обґрунтовано актуальність теми дисертації, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, визначено мету та завдання досліджень. Викладено наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів, особистий внесок здобувача при одержанні цих результатів, а також наведено інформацію щодо структури та обсягу дисертації, публікацій та апробації роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану досліджень у перспективній області НВЧ-енергетики – БПЕ мікрохвильовим лучом, основні принципи та класифікацію методів фокусування ЕМВ. Проведено огляд основних робіт по теорії та техніці ректен, розглянуті їх основні характеристики та шляхи їх поліпшення. Визначено коло теоретичних та практичних завдань, що підлягають рішенню.

В останні роки ряд перспективних проектів БПЕ наземного та космічного базування розробляються в США, Японії і Росії. У США ведуться інтенсивні розробки космічних сонячних електростанцій (КСЕС). Крім КСЕС, можливим додатком ідеї БПЕ розглядаються доставка енергії з багатих паливом важкодоступних районів у промислові райони з великим енергодефіцитом, енергопостачання КА, систем БПЭ безпілотних літальних апаратів (БЛА) (висотних стаціонарних платформ, літаків, дирижаблів та ін.). Розглянуті в огляді літератури системи БПЕ використовують традиційне ПФ фокусування ЕМВ, яке має ряд недоліків, з них найбільш істотні (на думку автора), наведено на стор. 1 автореферату. Усунення цих недоліків, в запропонованих в дисертаційній роботі системах БПЕ, є основною метою досліджень автора. Сучасні системи БПЕ до важкодоступних наземним об'єктів повинні бути мобільними, екологічно безпечними і не вимагати величезних фінансових вкладень для їх реалізації та експлуатації.

Ефективність системи БПЕ характеризується величиною результуючого ККД, який визначається як добуток наступних складових: ККД перетворення енергії первинного джерела в енергію ЕМВ, ККД передачі енергії ЕМВ через простір і величиною ККД ректени. ККД ректени можна представити у вигляді добутку трьох парціальних складових: ККД перехоплення, випрямлення і збору потужності постійного струму ректени, що визначають ефективність прийому і перетворення енергії ЕМВ в постійний струм. Саме за рахунок фокусування ЕМВ в площині розташування апертури ректени вдається досягти високого ККД перехоплення.

Спочатку завдання фокусування ЕМВ виникло при проведенні вимірювань діаграм спрямованості крупноапертурних антен у ближній зоні. При цьому використовуються традиційні ПФ і ПВ методи фокусування ЕМВ в зоні Френеля. Фокусування ЕМВ в плоских ФАР кінцевих розмірів при ПФ управлінні реалізується шляхом встановлення навмисних квадратичних фазових зрушень початкових фаз струмів випромінювачів, а при ПВ управлінні - встановленням часових затримок початку випромінювання сигналів з випередженням до країв апертури для забезпечення одночасного приходу сигналів від всіх випромінювачів в точку фокусування і рівності набігу фаз сигналів в ній. ПФ управління сигналами, що випромінюються є одним з основних при всіх інших відомих методах фокусування ЕМВ. Наступним кроком на шляху розвитку засобів і методів фокусування ЕМВ, були роботи, пов'язані із створенням різних РЕЗ для здійснення прихованого зв'язку між об'єктами (у локальних областях простору) і засобів ФУП. Це призвело до подальшої модифікації традиційних методів управляемого фокусування ЕМВ та розробки на їх основі більш ефективних методів фокусування ЕМВ з використанням взаємоузгодженого просторово-фазово-частотного (ПФЧ) і

просторово-фазово-частотно-часового (ПФЧЧ) управління сигналами в плоских ФАР кінцевих розмірів і БСВ. Основними їх перевагами є:

- забезпечення високої концентрації енергії сфокусованих ПЧІ у вузьких ПЧ інтервалах (аж до наносекундних) в першій половині зони Френеля та збереження їх форми при поширенні в заданому кутовому напрямі, як у другій половині зони Френеля, так і в зоні Фраунгофера;

- несуттєва залежність протяжності ПЧІ вздовж напрямку поширення від розмірів апертури передавальної ФАР або апертури (еквівалентної бази) МСВ;

- забезпечення високої швидкості сканування сфокусованого ЕМВ (за час усередненої тривалості імпульсів випромінювачів) як вздовж заданої в просторі прямої (при ПФЧ управління), так і в межах заданого в просторі відрізка прямої (при ПФЧВ управління).

Застосування БСВ дозволяє збільшити зону Френеля, тим самим збільшити відстань від передавальної підсистеми БПЕ до точки фокусування, де здійснюється енергетичний вигравш за рахунок фокусування ЕМВ по щільності потоку потужності в порівнянні з випадком синфазного збудження ФАР. Це досягається за рахунок можливості здійснювати будь-яке необхідне просторове розташування джерел випромінювання у МСВ, що дозволяє змінювати необхідний лінійний розмір ефективної апертури (еквівалентної бази) БСВ. Також БСВ дозволяє при відносно невеликих потужностях випромінювання окремих джерел випромінювання у БСВ, отримувати необхідне високе значення щільності потоку потужності в точці фокусування за рахунок збільшення числа джерел випромінювання у БСВ. Ця гідність дозволяє зменшити для БСВ обмеження за розмірами зон безпеки для обслуговуючого персоналу і населення порівняно з необхідними розмірами і потужністю крупноапертурних ФАР для здійснення передачі енергії з тієї ж, що і для БСВ щільністю потоку потужності ЕМВ на туж відстань.

За результатами проведених досліджень характеристик ректен, отримані наступні висновки, необхідні для вибору оптимальних конструктивних рішень для ректен з метою створення ефективних систем БПЕ до важкодоступних об'єктів:

1. Для зменшення рівня випромінювання на частотах гармонік, збільшення потужності в навантаженні ректени за рахунок мінімізації втрат енергії перерозподіляючомуся на частоти вищих гармонік, необхідно провести додаткові дослідження частотно-селективних поверхонь.

2. При виготовленні друкованих плат на вищих частотах, для зменшення втрат, збільшення точності травлення, краще використовувати технологію мікромодульних інтегральних схем, яка об'єднує НВЧ-схемотехніку і технологію інтегральних схем. В цьому випадку лінійна та нелінійна частина ректени виготовляється в єдиному технологічному циклі.

3. Придушення випромінювання на частотах гармонік реалізується вибором геометрії випромінювачів, установкою вхідних фільтрів низької частоти (ФНЧ) або застосуванням частотно-селективних поверхонь.

4. У разі роботи ректени при сильних вітрових навантаженнях, необхідно при мінімальних її масогабаритних показниках, збільшити питому потужність, що знімається з одиниці площі апертури. Така задача вирішується або збільшенням робочої частоти, або використанням поляризації поля, що обертається. У зв'язку з

цим необхідно провести пошук оптимальних конфігурацій ПВЕ, що працюють на ортогональних поляризаціях.

5. Для підвищення надійності ректени необхідно провести пошук схемних рішень ПВЕ, що дозволяють послабити вплив виходу з ладу випрямляючих діодів на ефективність перетворення енергії НВЧ - луча в енергію постійного струму.

6. Для зменшення ваги, габаритів і спрощення конструкцій ректен, необхідно використання мікрополоскової технології на основі підкладок з високою діелектричною проникністю і малими втратами.

У **другому розділі** проведено обґрунтування вибору методу фокусування ЕМВ, прийнятого для систем БПЕ, обґрунтовано й висунуто вимоги до структури і параметрів випромінюваних сигналів. Обґрунтовано та описано структурно-алгоритмічні принципи побудови та запропоновано варіанти технічної реалізації систем БПЕ до важкодоступних гірських і наземних об'єктів. Проведено аналіз основних характеристик ПВЕ та обґрунтовані вимоги до конструктивного виконання і геометричним розмірам ректени.

Системи БПЕ до важкодоступних наземних об'єктів повинні володіти, поряд з високими енергетичними характеристиками й продуктивністю, простотою реалізації. У них заздалегідь відомі просторове положення та центральні робочі частоти передавальної і приймальної підсистем. Тому для зниження енергетичних і тимчасових втрат у них не повинно бути сканування НВЧ випромінювання. Компромісне і найбільш ефективне рішення цих вимог можливо, при використанні в передавальних підсистемах БПЕ БСВ з ПФЧ фокусуванням ОСД V-подібних багаточастотних (БЧ) радіоімпульсів. Такі БСВ створюють велику спектральну щільність в максимумах ЕМВ без сканування, при забезпеченні необхідних часових параметрів пачок сфокусованих імпульсів. Формування періодичних послідовностей сфокусованих ПЧ має принципове значення для створення систем БПЕ, тому що імпульсний режим заряду акумуляторів, які використовуються в якості навантаження приймальної підсистеми БПЕ для передачі накопиченої ними енергії споживачам, є найбільш оптимальним режимом при їх заряді.

Розподіл початкових частот джерел випромінювання в БСВ з фокусуванням ОСД V-подібних багаточастотних (БЧ) сигналів при невеликій кількості джерел випромінювання N можна записати в спрощеному вигляді:

$$f_{0n} = f_0 + |n| \Delta F_n, \quad (1)$$

де f_0 - початкова частота центрального джерела випромінювання в БСВ, f_{0n} - початкова частота n -го джерела випромінювання в БСВ, $\Delta F_n = \Delta f_{\max}/n$ – дискретність установки частоти випромінювачів в БСВ, Δf_{\max} – максимальне рознесення несучих частот випромінювачів по апертурі БСВ, $n \in \left[-\frac{N-1}{2}, \dots, 0; 0, \dots, \frac{N-1}{2} \right]$.

Розподіл початкових фаз випромінювачів у БСВ для когерентного додавання ЕМВ в точці фокусування $P_F(x_f, y_f, z_f)$, розміщеній на осі OZ прямокутної системи координат, також можна записати в спрощеному вигляді:

$$\varphi_{0n} = -2\pi f_{0n} \left(\frac{z_f}{c} - \frac{R_{Fn}}{c} \right), \quad (2)$$

де $R_{fn} = [(x_f - x_n)^2 + (y_f - y_n)^2 + (z_f - z_n)^2]^{1/2}$ – відстань між точкою фокусування й центром n -го випромінювача з координатами $P_F(x_f, y_f, z_f)$ і (x_n, y_n, z_n) відповідно, c – швидкість світла, z_f – відстань до точки фокусування від центрального випромінювача по осі OZ .

Спектральна густина потоку потужності ЕМВ в точці фокусування

$$S(x, y, z, t) = \left| \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sqrt{\frac{P_n G_n}{4\pi R_n^2}} e^{-j \left[2\pi f_{0n} \left(t - \frac{R_n}{c} \right) + \phi_{0n} \right]} \right|, \quad (3)$$

де відповідно $S(x, y, z, t)$ – спектральна густина потоку потужності ЕМВ в момент часу t ; P_n і G_n – потужність і коефіцієнт підсилення n -го випромінювача в БСВ; $R_n = [(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + (z - z_n)^2]^{1/2}$ – відстань до точки спостереження від n -го випромінювача.

За результатами математичного моделювання для БСВ із кількістю випромінювачів $N = 33$, розміщених рівномірно на осі OY завдовжки (базою апертури БСВ) $L = 500$ м, потужністю випромінювачів $P_n = 10$ кВт, несучій частоті випромінювача, що знаходиться в центрі $f_0 = 3$ ГГц, при максимальному рознесенні частот по апертурі БСВ $\Delta f_{\max} = 100$ МГц, для різних відстаней до точок фокусування було отримано ПЧ й енергетичні характеристики сфокусованих ПЧІ. Система координат і положення випромінювачів у БСВ з фокусуванням ЕМВ в точці $P_F(x_f, y_f, z_f)$ наведені на рис. 1.

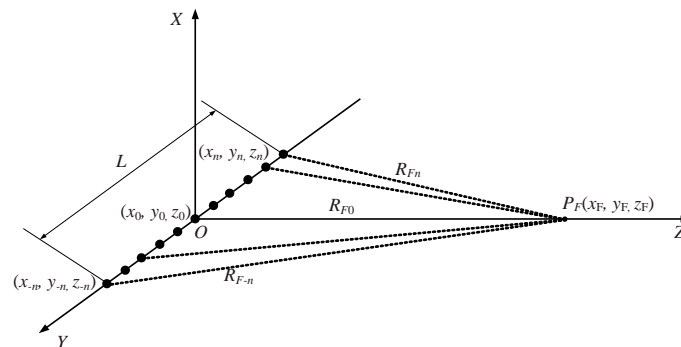


Рис.1 Розміщення випромінювачів у БСВ при фокусуванні ЕМВ в точці $P_F(x_f, y_f, z_f)$

Розподіли початкових частот і фаз по базі БСВ для випадку рівномірного розміщення її випромінювачів по осі OY , що розраховані за співвідношеннями (1) і (2), наведені на рис. 2.

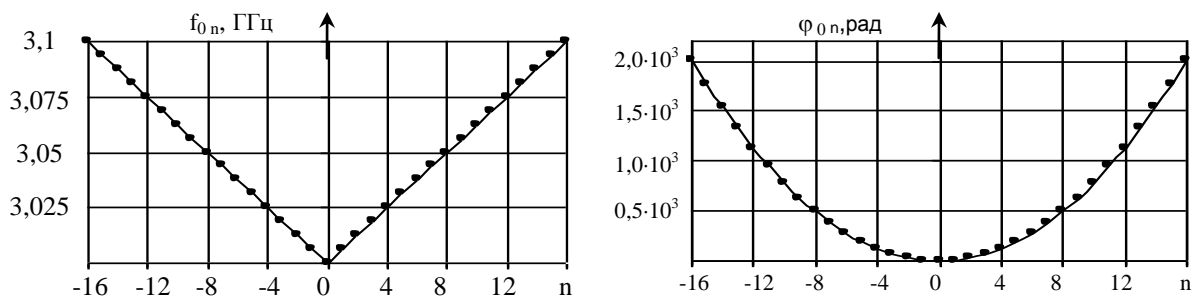


Рис. 2 Розподіл початкових частот та фаз по апертурі БСВ

Розподіли нормованих значень густини потоку потужності ЕМВ S_H по осі OZ (де $S_H = S / S_{\max}$) в околі точок $z_F^M = 4$ і $z_F^M = 14$, що розраховані за співвідношенням (3) наведені на рис. 3.

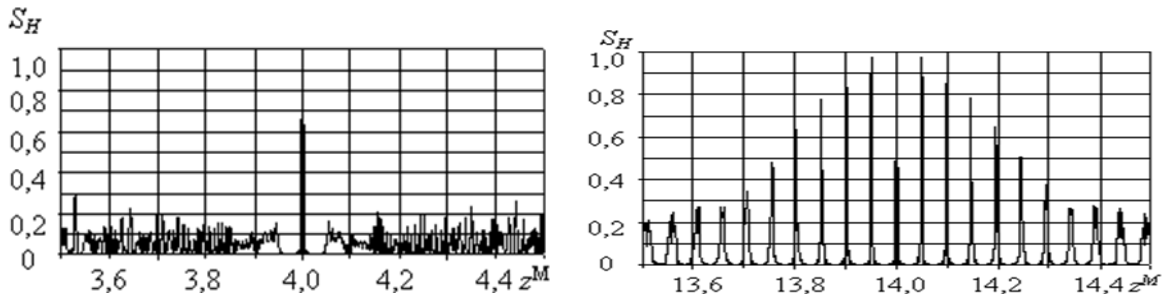


Рис. 3. Розподіли нормованих значень густини потоку потужності при $z_F^M=4$ та $z_F^M=14$

Аналіз результатів моделювання показує, що при виборі точки фокусування на дальності $z_F^M \leq 4$ формується лише одиночний ПЧІ. Зі збільшенням дальності до точки фокусування в просторі створюється послідовність ПЧІ, а кількість сфокусованих ПЧІ в періодичній послідовності зростає зі збільшенням дальності до точки фокусування z_F . При цьому тривалість і період проходження ПЧІ в періодичній послідовності дорівнюють $\tau_B \approx 1/\Delta F_{\max}$, $T_B = 1/\Delta F_n$. При цьому кутові розміри сфокусованих ПЧІ визначаються розміром апертури БСВ. В відомих публікаціях цей вид фокусування ЕМВ був розроблений з метою ФУП РЕЗ.

Специфіка роботи систем БПЕ до важкодоступних наземних і гірських об'єктів зумовлює особливості вимог до структури й параметрів сфокусованих ПЧІ:

- необхідність безперервної роботи протягом великих інтервалів часу при максимальній спектральній густині потоку потужності ПЧІ;
- виключення можливого виведення з ладу ПВЕ ректен і інших напівпровідникових елементів РЕЗ на об'єкті.

З урахуванням вищевказаного структуру пачок ПЧІ запропоновано створити у вигляді двох частин, які за необхідності тривалого впливу можуть випромінюватись s разів поспіль. Перша частина пачок ПЧІ повинна забезпечити максимально можливе значення щільності потоку потужності, що випромінюється від передавальної підсистеми БПЕ за сумарний час впливу пачок ПЧІ τ_{BS} . При цьому необхідно обрати енергетичні і часові параметри цієї частини структури пачок ПЧІ для виключення умов ФУП РЕЗ, які знаходяться на об'єкті. Друга частина пачок ПЧІ повинна бути у вигляді вільного інтервалу часу (без заповнення імпульсами ПЧІ) для забезпечення надійної релаксації теплових процесів у напівпровідникових радіоелементів РЕЗ, які знаходяться на об'єкті $\tau_{t,\max}$. Це необхідно для виключення деградації напівпровідникових радіоелементів за рахунок теплових ефектів, які викликані впливом першої частини структури пачок ПЧІ.

В відомих публікаціях обраний метод фокусування ЕМВ використовується з метою ФУП РЕЗ. Виходячи з параметрів пачки ПЧІ, які були обґрунтовані для мети ФУП, були обрані відповідні параметри структур пачок ПЧІ для систем БПЕ до важкодоступних наземним і гірським об'єктам, які забезпечують виключення функціональне ураження радіоелементів ректени і функціонального придушення приймальних трактів РЕЗ, що знаходяться на об'єкті.

Щоб виключити вивід зі строю радіоелементів ректен та інших РЕЗ на об'єкті, як мінімум з десятикратним енергетичним запасом, число імпульсів в пачці ПЧІ повинно дорівнюватись $N_B = (N_{BP}/10) = 10^6$, де N_{BP} – обґрунтоване в публікаціях число ПЧІ у пачці для здійснення ФУП РЕЗ. Для виключення підтримування стійкого режиму самозбудження приймальних пристроїв, період проходження ПЧІ повинен

бути не менш $T_B=80$ нс (для виконання умов $T_B < \tau_{П}$, де $\tau_{П}=22\dots76$ нс - постійна встановлення власних коливань більшості приймачів різних РЕЗ). Тривалість ПЧІ повинна бути не менш $\tau_B=20$ нс (для виконання умов $\tau_B \geq \tau_K$ де $\tau_K=10$ нс – час спрацьовування кращих пристроїв захисту від перевантажень по НВЧ входу реальних РЕЗ) і відповідно тривалість пачки ПЧІ без урахування інтервалів між ними $\tau_{B\Sigma}=10^6 \tau_B=20$ мс. Друга частина структури ПЧІ повинна бути у вигляді вільного інтервалу часу (без заповнення імпульсами ПЧІ), який дорівнює максимально можливому значенню постійної часу релаксації теплових процесів для напівпровідникових радіоелементів $\tau_{т.макс}=410$ нс. Повна тривалість такої структури пачок ПЧІ дорівнює

$$\tau_{B\Sigma S}=S [N_B \cdot T_B + \tau_{т.макс}], \quad (4)$$

де s – необхідна кількість повторювання обох частин структури пачки ПЧІ протягом необхідного часу впливу на ректену приймальної підсистеми БПЕ для передачі необхідної електричної потужності.

Для систем БПЕ до наземних об'єктів в якості випромінювачів у БСВ запропоновано використовувати станції наведення ракет (СНР) зенітно-ракетного комплексу (ЗРК) типу «ТОР-М1». Вони мають закріплені на кабінах квадратні ФАР з розмірами $L_X=L_Y=1,7$ м, які складається з 4-х підрешіток і висотою фазового центру ФАР $h_a=5$ м. Максимальну дальність фокусування при висоті фазових центрів ФАР у СНР h_a й ректенн h_p доцільно задавати не більше дальності прямої радіолокаційної видимості $D_{ПВ}$, що розраховується за відомою формулою:

$$z_F \leq D_{ПВ} = 4,12 [(h_a)^2 + (h_p)^2]^{1/2}, \quad (5)$$

тоді максимальна дальність фокусування дорівнює:

$$z_f \leq D_{ПВ} = 4,12 [(h_a)^2 + (h_p)^2]^{1/2} = 4,12 [(5)^2 + (5)^2]^{1/2} \approx 29 \text{ км.}$$

На підставі вищевказаного для передавальної підсистеми БПЕ до важкодоступних наземних об'єктів обґрунтовані наступні доцільні параметри БСВ:

1. Передавальна БСВ складається з СНР із ФАР:

1.1 Для БПЕ-1 до наземних об'єктів база $L_1=1000$ м, число СНР із ФАР $N_1=9$, дальність фокусування $z_{F1} \leq D_{ПВ}=29$ км. Для БПЕ-2 до гірських об'єктів, при обрані $z_{F2} \leq 7$ км, база $L_2=700$ м, а число СНР із ФАР $N_2=5$.

Розмір бази БСВ L вибрано для виконання умови $0,01z_D \leq z_F \leq 0,02z_D$, де $z_D=2L^2/\lambda_0$ – відстань до початку далекої зони апертури БСВ, λ_0 – довжина хвилі в центральному випромінювачі БСВ, що дозволяє одержати вигреш за рахунок фокусування ЕМВ на основі ПФЧ керування у величині густини потоку потужності порівняно з випадком звичайного синфазного випромінювання в зоні Френеля на 37...27 дБ відповідно. Крім цього, розмір бази БСВ визначає розмір сфокусованого ПЧІ по осях ОХ і ОУ (поперечні лінійні розміри ΔX і ΔY), які визначаються за наближеним співвідношенням $\Delta X = \Delta Y = (\lambda_0 / L) z_F$, яка має бути узгоджена з лінійним розміром апертури ректени приймальної підсистеми БПЕ для мінімізації втрат енергії ЕМВ при її передачі БСВ передавальної підсистеми БПЕ.

Кількість СНР із ФАР N вибрано для забезпечення компромісного розв'язання задачі одержання максимальної спектральної густини потоку потужності ПЧІ, виключення можливого виведення з ладу напівпровідникових елементів на позиції приймальної підсистеми БПЕ й зменшення зони безпеки населення й операторів.

2. Випромінювані сигнали - ОСД V-подібні БЧ ЛЧМ когерентні пачки радіоімпульсів: максимальне рознесення частоти $\Delta F_{\max}=50$ МГц і дискретність частоти $\Delta F_n = 12,5$ МГц.

Співвідношення для розрахунків максимальних густин потужності ОСД V-подібних МЧ ЛЧМ когерентних пачок радіоімпульсів виходячи з (3), має вигляд:

$$S_{\max} = N_{\text{МС}}^2 P_{\text{ПФ}} G_{\text{ПФ}} / (4\pi Z_{\text{Ф}}^2), \quad (6),$$

де $N_{\text{МС}}$ – кількість підрешіток ФАР в БСВ, $P_{\text{ПФ}}$ - потужність імпульсного випромінювання підрешіток ФАР, $G_{\text{ПФ}}$ - коефіцієнт підсилення підрешіток ФАР.

Пропоновані технічні рішення реалізації ректени полягають у наступному. Для зменшення площі апертури ректену виконано у вигляді двошарової мікросмужкової конструкції (рис. 4) ПВЕ на діелектричній підкладинці, які працюють на ортогональних поляризаціях. Випромінюючу систему виконано у вигляді сукупності колінеарних стрічкових мікросмужкових провідників, у розриви яких через рівні проміжки включені діоди Шоттки (в ході досліджень обрано безкорпусний діод 3A149A-3).

Використання таких випромінювачів конструктивно вигідно із двох причин. По-перше, легко реалізується послідовно-паралельна схема збору потужності постійного струму. Для одержання заданої потужності в навантаженні ректени необхідні певні значення електрорухової сили ректени E_r і опору ректени R_r за постійним струмом. Необхідне значення E_r досягається послідовним з'єднанням ПВЕ в лінійці, а R_r – паралельним з'єднанням лінійок. По-друге, підвищується надійність ректени, тому що при виході з ладу ряду лінійок ректена збереже свою працездатність.

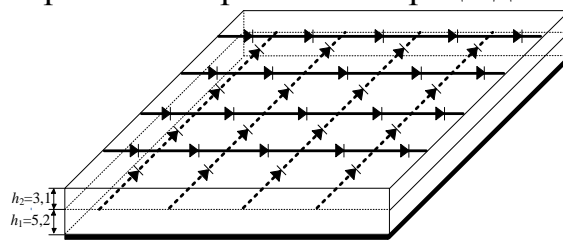


Рис. 4 Фрагмент ректени на ортогональних поляризаціях

У **третьому розділі** розглянуто можливість створення перспективних систем БПЕ для аварійного енергопостачання та додаткового енергозабезпечення КА.

В останні роки інтенсивно використовуються КА, які експлуатуються на низьких близьких до колових сонячно-синхронних орбітах заввишки 250...700 км. До складу ПСЕЗ КА цього класу для розробленої в Україні типової платформи як джерела енергії використовуються чотири панелі БС каркасного типу, які жорстко фіксуються щодо платформи КА з арсенід-галійовими фотоперетворювачами (ФП), а як елемент накопичення енергії – БХ, що складається з герметичних нікель-кадмійових акумуляторів з розрядною напругою БХ, діапазон зміни якого забезпечує необхідну напругу живлення бортової апаратури КА 24...34 В.

Панелі БС мають обмежені габаритні розміри, визначувані конструкцією платформи КА, тому при використанні ФП певного типу значення величини струму, що віддається БС у навантаження, є фіксованим і залежить лише від орієнтації КА на Сонце. Однак у нових розробках енергоспоживання бажаного складу бортового обладнання КА й запропонованої до установки на нього наукової апаратури

перевищує існуючі енергетичні можливості застосовуваної ПСЕЗ КА для штатної платформи розроблених в Україні НМ КА («Egyptsat-1», «МС-2-8» і «Мікросат»).

Одним з альтернативних методів одержання додаткової енергії для ПСЕЗ КА пропонується використання системи БПЕ. Ректену приймальної підсистеми БПЕ можна розмістити на невикористовуваних у цей час тильних сторонах панелей БС (Рис.5а). Загальна площа штатних 4-х панелей БС становить 1,6 м². Крім того, при використанні даного методу одержання додаткової енергії для ПСЕЗ такого класу КА можливо при аварійній повній або частковій відсутності заряду БХ КА від БС, за певну кількість витків КА одержати додаткову електроенергію для заряду БХ до мінімального рівня, необхідного для здійснення роботи командної радіолінії КА у випадку позаштатної аварійної ситуації роботи системи орієнтації КА, для забезпечення можливості здійснення корекції програмного забезпечення системи керування КА із Землі.

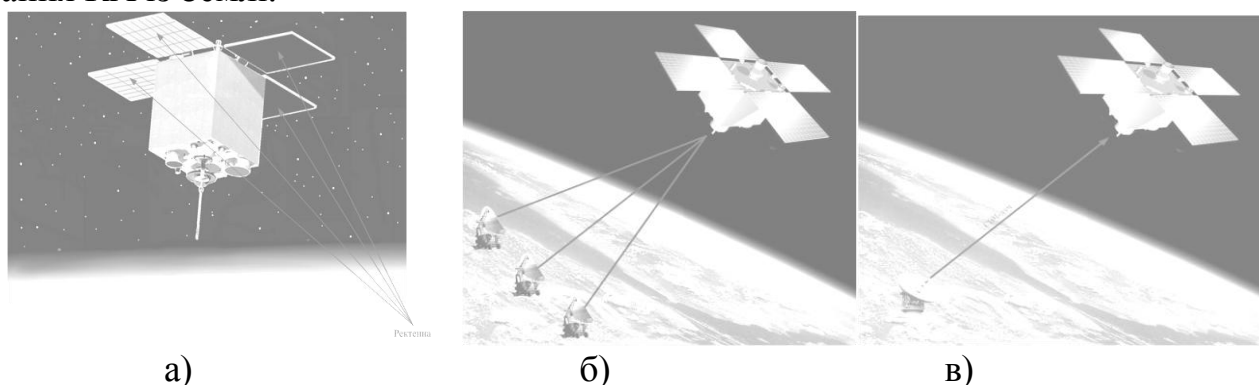


Рис. 5 а) Розміщення ректени на тильних сторонах панелей сонячних батарей НМ КА, б) Використання як передавальної підсистеми БПЕ радіотелескопа РТ-70, в) Використання як передавальної підсистеми БПЕ багатопозиційної системи випромінювачів РЛС типу «Огляд-3».

Наземну передавальну підсистему БПЕ КА необхідно розташовувати на місцевості поблизу позиційного знаходження наземних РЕЗ керування КА, тому що під час знаходження в зоні огляду даних засобів, КА орієнтований тильними сторонами панелей БС на Землю.

КА в процесі орбітального польоту навколо Землі залежно від кута нахилу орбіти знаходяться у межах зони огляду наземних РЕЗ керування КА, на прикладі КА «МС-2-8», від 4 до 6 витків за добу й залежно від азимутального напрямку на КА при вході його в зону огляду за часом знаходяться у ній на кожному витку від 7 до 13 хвилин (при дальності входу в зону огляду від 2000 до 3000 км), що дозволяє за кілька витків за допомогою пропонованої системи БПЕ КА зібрати додаткову (поряд із БС) електроенергію.

За передавальну підсистему БПЕ для здійснення додаткового енергопостачання КА при виникненні вищевказаної позаштатної аварійної ситуації, можливе використання радіотелескопу РТ-70 (м. Євпаторія). При цьому, при проходженні через зону радіовидимості РТ-70 (Рис.5б), можна здійснити аварійне енергопостачання для здійснення короткочасної роботи лише командної радіолінії або за кілька витків КА, можливо здійснити заряд БХ до мінімально необхідного для короткочасної роботи командної радіолінії й системи керування КА. Густина потоку потужності, яку створює двоканальний передавач «Голіаф» РТ-70 (потужність випромінювання якого складає 200 кВт у безперервному режимі) на відстані

$r = 600$ км біля апертури ректени, з урахуванням втрат на трасі поширення ЕМВ -1,3 дБ для частоти випромінювання $f_0 = 5,01$ ГГц, становить $S_{\max} = 0,316$ Вт/м².

В роботі запропоновано конструкцію багат шарової ректени із коловою поляризацією, що забезпечує (на дальності між РТ-70 і КА 600 км) ККД випромінювання ректени 37,9 %, струм заряду БХ $I_L = 0,1$ А при напрузі в навантаженні $U_L = 34$ В при її розміщенні на тильних сторонах БС і на теплових екранах КА, що мають загальну площу 3,2 кв.м, які в платформі КА в цей час не використовуються.

Для здійснення більш ефективного додаткового енергопостачання КА доцільно створити мобільну потужну передавальну підсистему БПЕ шляхом використання як випромінювачів БСВ РЛС типу «Огляд-3» (1РЛ141), що входить до складу радіовисотоміра ПРВ-17 (із імпульсною потужністю 2,5 МВт) із ПФ або ПФЧ фокусуванням ОСД V-подібних МЧ радіоімпульсів. (Рис. 5в).

У **четвертому розділі** для запропонованої системи БПЕ проведено розрахунки сумарної потужності за постійним струмом передаваної в навантаження ректени (споживачеві) P_{BES} за $\Delta t_{\text{BES}} = 2,4,8$ і 16 годин неперервної роботи системи БПЕ. Ця потужність створюється послідовностями пачок ПЧІ протягом сумарного часу їхнього впливу без урахування інтервалів між ПЧІ в пачках і між пачками при с циклах випромінювання БСВ за час неперервної роботи системи БПЕ.

Сумарну потужність за постійним струмом P_{BES} , створювану послідовністю пачок ПЧІ протягом сумарного часу їх впливу без урахування інтервалів між ними при с циклах випромінювання БСВ розраховуємо за наступним співвідношенням:

$$P_{\text{BES}} = S_{\max} \cdot A_p \cdot K_{\text{ир}} \cdot \eta_B \cdot \Delta t_{\text{BES}} / (N_B \cdot T_B + \tau_{\text{т.макс}}), \quad (7)$$

де A_p – площа апертури ректени, $K_{\text{ир}} = 0,8$ – коефіцієнт використання апертури ректени та η_B – ККД ректени.

Результати цих розрахунків для системи БПЕ-1 наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Сумарна потужність постійного струму, що передається в навантаження ректени (P_{BES}) за час неперервної роботи системи БПЕ -1 (Δt_{BES})

Дальність до Z_{F1} , км	Передана сумарна потужність P_{BES} , МВт			
	Час неперервної роботи системи БПЕ -1 Δt_{BES} , годин			
	2 години	4 години	8 годин	16 годин
10	3,81	7,62	15,24	30,48
15	1,49	2,98	5,86	11,72
20	0,76	1,52	3,04	6,08
29	0,29	0,58	1,16	2,32

Для оцінки впливу конструктивних та електричних параметрів БСВ на процес здійснення фокусування ЕМВ було проведено математичне моделювання. При цьому система координат розташовувалася з початком в центральному випромінювачі БСВ і віссю OZ, спрямованої по нормалі до апертурі БСВ вздовж якої здійснювалася фокусування ЕМВ. При проведенні розрахунків за співвідношенням (3) щільності потоку потужності, яка створюється БСВ в заданих точках фокусування на дальності Z_f , вносилися рівномірно розподілені випадковим чином відповідні помилки.

За результатами математичного моделювання, частина яких представлена на рис. 6, проведена оцінка максимальних значень помилок розташування фазових

центрів випромінювачів ΔX , ΔY , Δz , і помилок встановлення початкової фази $\Delta\phi$ в кожному джерелі випромінювання при яких рівень математичного очікування нормованої щільності потоку потужності випромінювання МСИ сфокусованих ПВІ в околі точки фокусування змінюється не більш ніж на 10% при зміні дальності до точки фокусування від $Z_f = 4L_{\text{эф}}$. до $Z_f = 24L_{\text{эф}}$.

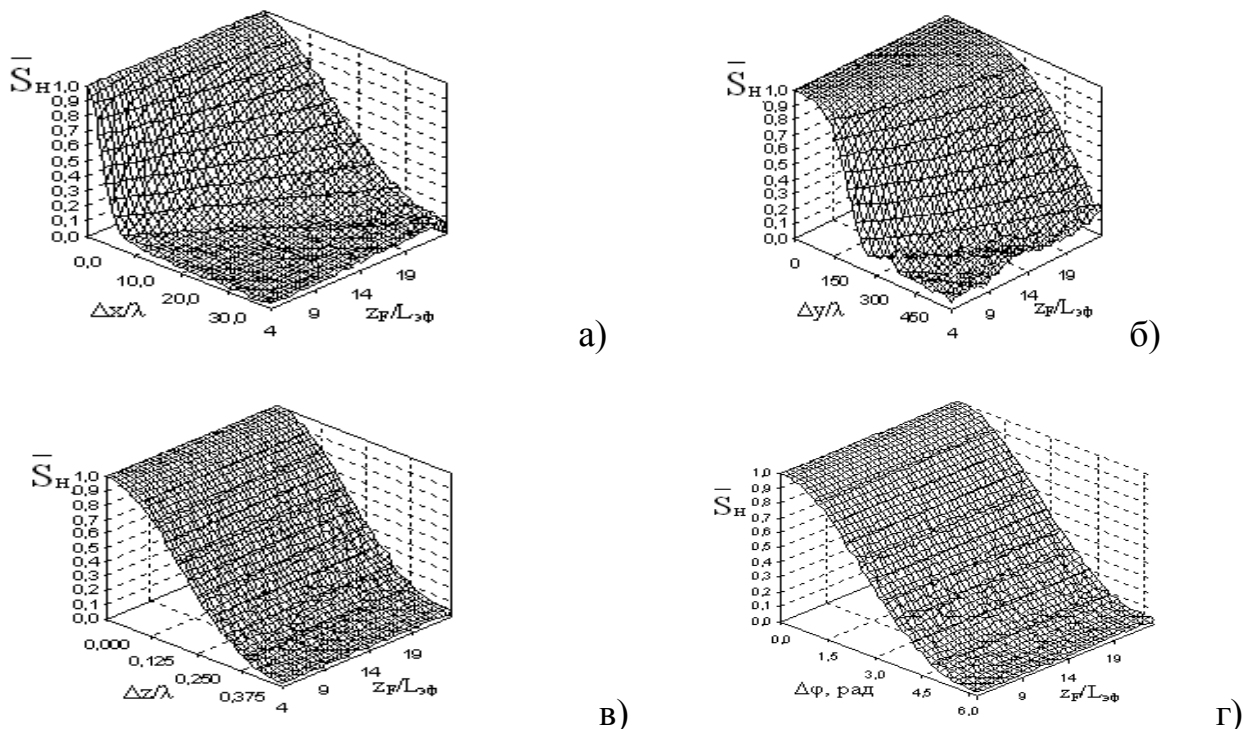


Рис. 6 Залежність значення S_H випромінюваного БСВ від похибок розміщення координат фазових центрів випромінювачів а) Δx , б) Δy , в) Δz та похибок установки початкової фази по випромінювачам г) $\Delta\phi$.

ВИСНОВКИ

У результаті дисертаційних досліджень вирішено актуальну науково-практичну задачу удосконалення систем безпроводової передачі енергії мікрохвильовим променем, що дозволяє, у порівнянні з раніше відомими, підвищити їх ККД.

У дисертації отримані наступні основні результати:

1. При розташуванні ректени системи БПЕ на початку зони Френеля, на відстанях (0,01...0,02) від дальньої межі зони Френеля, забезпечується найбільший вигреш у величині переданої щільності потоку потужності ЕМВ.

2. При використанні в системі БПЕ багатоступеневих методів фокусування ЕМВ, на відміну від традиційно застосовуваного у відомих системах БПЕ ПФ фокусування ЕМВ, забезпечуються необхідні геометричні розміри області фокусування.

3. Застосування в системі БПЕ в якості передавальної антени - БСВ, дозволяє збільшити протяжність зони Френеля (при збільшенні еквівалентної апертури БСВ) і забезпечити необхідну щільність потоку потужності ЕМВ на ректені, при забезпеченні необхідних зон біологічної безпеки в околиці випромінювачів БСВ.

4. Застосування в системах БПЕ ОСД V-подібного фокусування БЧ радіоімпульсів, яке у відомих публікаціях застосовується в інтересах ФУП РЕЗ, найбільш доцільно та при відносній простоті її технічної реалізації дозволяє випромінювати послідовність ПЧІ з необхідними структурою і параметрами.

5. Розроблена в ході дисертаційних досліджень методика дозволяє визначити основні характеристики БСВ системи БПЕ та необхідні параметри сигналів, що випромінюються для забезпечення максимальної потужності передавання, за умови недопущення ФУП приймальної підсистеми і РЕЗ споживачів енергії, що знаходяться в її околиці.

6. Проведено аналіз та вибрані конструктивні рішення по топології виготовлення ПВЭ і схеми збору потужності, що дозволяють підвищити надійність роботи ректени.

7. За результатами проведених розрахунків потенційних характеристик ПВЕ обраний тип діоду, що дозволяє досягти ККД випрямлення ректени до 85%.

8. Застосування запропонованої двошарової конструкції ректени, яка працює на ортогональних поляризаціях, підвищує значення питомої потужності постійного струму, що знімається з одиниці площі апертури ректени та дозволяє поліпшити її масогабаритні показники, тим самим зменшити вітрове навантаження на ректену, при забезпеченні сумарного ККД ректени від 37,8 до 43%.

9. Результати математичного моделювання підтвердили доцільність і можливість технічної реалізації систем БПЕ до важкодоступних об'єктів.

10. Для двох запропонованих варіантів систем БПЕ до важкодоступних наземних та гірських об'єктів визначено структурно-алгоритмічні пропозиції щодо їх побудови, розраховано їх основні конструктивні, електричні параметри, зони біологічної безпеки та їх продуктивність. Результати цих досліджень підтвердили доцільність створення таких систем БПЕ, при забезпеченні зон безпеки не більш як для системи БПЕ-1 – 170 метрів, а для системи БПЕ-2 – 117 метрів.

11. За результатами математичного моделювання оцінено вплив можливих відхилень конструктивних і електричних параметрів на здійснення фокусування ЕМВ для запропонованих систем БПЕ, результати яких підтвердили їх реалізація на існуючій елементній базі.

12. В роботі розроблені пропозиції і показана принципова можливість та шляхи технічної реалізації перспективних систем БПЕ для здійснення аварійного енергопостачання низькоорбітальних КА і можливого додаткового енергозабезпечення спільно з існуючою штатною ПСЭЗ КА.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гомозов, А.В. Передающая подсистема бес-проводной передачи энергии труднодоступным объектам на основе многопозиционной системы излучателей с фокусировкой излучения (Часть 1) / А.В. Гомозов, В.И. Гомозов, В.М. Шокало, Д.В. Грецих, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. Выпуск 165. – Харьков: ХНУР, 2011. – С. 112-119.

2. Гомозов, А.В. Передающая подсистема бес-проводной передачи энергии труднодоступным объектам на основе многопозиционной системы излучателей с фокусировкой излучения (Часть 2) / А.В. Гомозов, В.И. Гомозов, В.М. Шокало, Д.В. Грециких, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. Выпуск 167. – Харьков: ХНУР, 2011. – С. 18-24.

3. Грециких, Д.В. Методика расчета приемно-выпрямительных элементов ректенн систем беспроводной передачи энергии / Д.В. Грециких, А.В. Гомозов, Ш.Ф.А. Аль-Самарай, В.А. Назаренко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. Збірка наукових праць. Випуск 4(81) липень-серпень 2011 р., Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ». – Х., 2011. – С. 94-105.

4. Gretsikh, D.V. Antenna-rectifier for power supply subsystem of low-small spacecraft /D.V. Gretsikh, A.V. Gomozov, V.M. Shokalo, Sh.F.A. Al-Sammarrarie // Microwave technologies application: coll.scien.papers VIII International conference on antenna theory and techniques. Kyiv, Ukraine, 20-23 September, 2011. National Technical University of Ukraine “Kyev Polytechnic Institute”– K., 2011. – P. 315-317.

5. Гомозов, А.В. Возможность реализации системы беспроводной передачи энергии к труднодоступным объектам на многопозиционной системе с фокусировкой излучения и ректенне / А.В. Гомозов, В.М. Шокало, Д.В. Грециких, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии: сб. науч. тр. 4-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». 18-21 октября 2011 г. Ак-я прикл. радиоэл-ки, Харьк. нац. ун-т радиоэл-ки. – Том I. Часть 1. – Х., 2011. – С. 365-370.

6. Гомозов, А.В. Возможность повышения энергоснабжения низкоорбитальных космических аппаратов при использовании беспроводной передачи энергии микроволновым лучом / А.В. Гомозов, Д.В. Грециких, А.В. Губа, А.В. Нарисhev, Ш.Ф.А. Аль-Самарай, О.Л. Синько // Технология приборостроения, науч.-технич. журнал, Гос. предпр. науч.-иссл. технологич. ин-т. – Вып. 2'2011 г – Х., 2011. – С. 27-33.

7. Gomozov, A.V. Principles of construction and application of modern microwave wireless energy transmission systems [Text] / A.V. Gomozov, V.M. Shokalo, D.V. Gretsikh, Sh.F.A. Al-Sammarrarie, O.S. Lukavenko // Proceedings of the XIth International Conference “Modern problems of radio engineering telecommunications and computer science” (TCSET'2012) Dedicated to the 60th anniversary of the Radio Department at the Lviv Politechnic National University. Lviv-Slavske, Ukraine, 21-24 February, 2012. Lviv Politechnic National University- L., 2012. – P. 27-29.

8. Gomozov, A.V. Principles of construction and application of the microwave systems for wireless energy transmission of ground and space basing / A.V. Gomozov, D.V. Gretsikh, V.M. Shokalo, Sh.F.A. Al-Sammarrarie // IEEE Computetional problems of electrical engineering. Vol.2, No. 1, 2012. Lviv PolitechnicNational University – L.: 2012. – P. 15-23.

9. Гомозов, А.В. Возможные варианты реализации и принципы построения систем беспроводной передачи энергии с фокусировкой излучения для наземных и космических объектов / А.В. Гомозов, В.М. Шокало, Д.В. Грециких, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Технология приборостроения, науч.-технич. журнал, Гос. предпр. науч.-

иссл. технологич. ин-т. – Вып. 1'2012 г – X., 2012. – С. 13-21.

10. Гомозов, А.В. Статистический анализ и оценка влияния электрических и конструктивных параметров передающей подсистемы беспроводной передачи энергии к труднодоступным объектам на основе многопозиционной системы излучателей с фокусировкой излучения / А.В. Гомозов, В.М. Шокало, Д.В. Грецких, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Материалы конференции 22-й Междунар. Крымской конференции «СВЧ-техника и информационные технологии» 10-14 сентября 2012 г. Севастополь, Крым, Украина. Том II. - Севастополь: КрыМиКо, 2012. - С. 921-922.

11. Грецких, Д.В. Области применения и современные тенденции развития наноректенн / Д.В. Грецких, А.В.Гомозов, Н.М. Цикаловский, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Технология приборостроения, науч.-технич. журнал, Гос. предпр. науч.-иссл. технологич. ин-т. – Вып. 2'2012 г – X., 2012. – С. 36-42.

12. Грецких, Д.В. Исследование приемно-выпрямительных элементов ректенн систем беспроводной передачи энергии к труднодоступным объектам / Д.В. Грецких, А.В. Гомозов, Ш.Ф.А. Аль-Самарай, Д.Ю. Горелов, А.А. Сторожев// Радиотехника. Всеукраинский межве-домственный научно-технический сборник. Выпуск 173. – Харьков: ХНУР, 2013. – С. 42-47 .

13. Аль-Самарай, Ш.Ф.А. Беспроводная передача энергии к труднодоступным объектам на дальности прямой видимости на основе сфокусированной многопозиционной антенной системы / Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Технология приборостроения, науч.-технич. журнал, Гос. предпр. науч.-иссл. технологич. ин-т. – Вып. 1'2013 г – X., 2013. – С. 11-22.

14. Gretsikh, D.V. Researches of receiving-rectifying element of the rectennas for wireless power transmission systems to remote objects / D.V. Gretsikh, A.V. Gomozov, A.A. Storogev, Sh.F.A. Al-Sammarrarie // IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques, 2013, Odessa, Ukraine. – P. 552-554.

АНОТАЦІЯ

Шаміль Фадель Альван Аль-Самарай. Радіотехнічні системи безпроводової передачі енергії на основі сфокусованої багатопозиційної антени. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. Харківський національний університет радіоелектроніки. – Харків, 2013 р.

У результаті дисертаційних досліджень вирішено актуальну науково-практичну задачу удосконалення систем безпроводової передачі енергії мікрохвильовим променем, що дозволяє, у порівнянні з раніше відомими, підвищити їх ККД.

У дисертації зроблено аналіз принципів побудови перспективних систем БПЕ до важкодоступних об'єктів, вибір доцільного методу фокусування електромагнітного випромінювання у порівнянні з методом фокусування в існуючих системах БПЕ. Запропоновані: вдосконалений метод розрахунку конструктивних і електричних параметрів для запропонованих систем БПЕ, оцінені їх продуктивність, зони біологічної безпеки та технічну реалізуємість, подальший розвиток методів

підвищення надійності ректен та підвищення значення подільної потужності постійного струму, що знімається з одиниці площі апертури ректени.

Результати дисертаційної роботи доцільно використовувати при розробленні перспективних систем БПЕ до важкодоступних об'єктів.

Ключові слова: безпроводова передача енергії, ректена, приймально-випрямляючий елемент, багатопозиційна система випромінювачів, важкодоступний об'єкт, фокусування електромагнітного випромінювання.

SUMMARY

Shamil Fadhil Alwan Al-Sammarraraie. Radio engineering system of wireless energy transmission based on the focused multi position antenna. - Manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Specialty 05.12.17 – radio engineering and television systems. Kharkov National University of Radio Electronics. – Kharkov, 2013.

The urgent scientific and practical problem associated with perfection of the wireless power transmission systems with a microwave beam was solved as a result of the dissertation research; this makes it possible to rise their efficiency as compared to the available systems.

The analysis of principles of prospective systems building for wireless power transmission (WPT) to almost inaccessible objects is carried out; the choice of the efficient method for electromagnetic radiation focusing as compared to the method for focusing in the available systems without WPT is substantiated. The proposals are done concerning the advanced method for calculation of the structural and electric parameters for the proposed WPT systems, their efficiency, the biological safety zones and technical realizability, further development of the method for rectennas reliability, increase in dc specific capacity taken from the unit of the rectenna aperture area.

The results of the dissertation are expedient to use when developing prospective and modernization of the available WPT to almost inaccessible objects.

Key words: wireless energy transmission, rectenna, the receiving-rectifying element, multipositional system of radiators, electromagnetic radiation focusing, remote object.

АННОТАЦИЯ

Шамиль Фадель Альван Аль-Самарай. Радиотехническая система беспроводной передачи энергии на основе сфокусированной многопозиционной антенны. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы. Харьковский национальный институт радиоэлектроники. – Харьков, 2013 г.

В результате диссертационных исследований решена актуальная научно-практическая задача усовершенствования систем беспроводной передачи энергии

микроволновым лучом, что позволяет, в сравнении с ранее известными, увеличить их КПД.

В диссертации проведен анализ принципов построения перспективных систем беспроводной передачи энергии к труднодоступным объектам, выбор целесообразного комбинированного метода фокусировки электромагнитного излучения в сравнении с традиционным методом фокусировки в существующих ранее системах БПЭ. Предложены: усовершенствованный метод расчета конструктивных и электрических параметров для предложенных систем БПЭ, оценены их производительность, зоны биологической безопасности и техническую реализуемость, дальнейшее развитие методов повышения надежности ректенн и повышение значения удельной мощности постоянного тока, снимаемой с единицы площади апертуры ректенны. Оценены основные характеристики предлагаемых систем беспроводной передачи энергии к труднодоступным наземным объектам. Разработаны предложения и пути технической реализации перспективных систем БПЭ для осуществления аварийного энергоснабжения низкоорбитальных космических аппаратов (КА) и дополнительного их энергообеспечения совместно с существующей штатной подсистемой энергообеспечения КА.

Результаты диссертационной работы целесообразно использовать при разработке перспективных и модернизации существующих систем БПЭ к труднодоступным объектам

Ключевые слова: беспроводная передача энергии, ректенна, приемно-выпрямительный элемент, многопозиционная система излучателей, труднодоступный объект, фокусировка электромагнитного излучения

Підп. до друку 28.10.13. Формат 60x841/16. Спосіб друку – ризографія.
Умов. друк. арк. 1,2. Тираж 100 прим.
Зам. № 2-918. Ціна договірна.

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

Віддруковано в навчально-науковому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ
Харків, просп. Леніна, 14