

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

**ГРЕЦЬКИХ ДМИТРО ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**



УДК 621.396.67:621.314.16

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ СИСТЕМ БЕЗПРОВІДНОЇ  
ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ**

05.12.07 – антени та пристрої мікрохвильової техніки

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**доктора технічних наук**

**Харків – 2021**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор фізико-математичних наук, професор

**Лучанінов Анатолій Іванович,**

Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, головний науковий співробітник НДЧ Харківського національного університету радіоелектроніки

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,

**Корнієнко Леонід Григорович,**

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба Міністерства оборони України, професор кафедри фізики та радіоелектроніки

доктор фізико-математичних наук, професор,

**Горобець Микола Миколайович,**

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри прикладної електродинаміки

доктор технічних наук, професор,

**Крижановський Володимир Григорович,**

Донецький національний університет імені Василя Стуса Міністерства освіти і науки України, в.о. завідувача кафедри радіофізики та кібербезпеки

Захист відбудеться « 6 » травня 2021 року о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розісланий « 2 » квітня 2021 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В. М. Безрук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Останнім часом все більша увага приділяється напрямку науки і техніки пов'язаним з розробкою інноваційних технологій створення нових високоефективних систем безпровідної передачі енергії (БПЕ).

Класична система БПЕ мікрохвильовим променем складається з передавальної підсистеми, в якій енергія первинного джерела перетворюється за допомогою мікрохвильового генератора і однопозиційної антени в сфокусоване електромагнітне випромінювання (ЕМВ). У зоні Френеля розташована приймальна підсистема у вигляді ректени (антени-випрямляча), завданням якої є приймання і перетворення ЕМВ в постійний струм, що надходить до споживача енергії. Всілякі області застосування класичних систем БПЕ широко описані в спеціалізованій літературі.

Освоєння більш високочастотних діапазонів радіо- та оптичного випромінювань, впровадження нових технологій в області мікро- і наноелектроніки, розвиток безпровідного зв'язку стимулювало появу нових напрямків БПЕ і дозволило по новому поглянути на класичні. В даний час можна вже виділити цілий ряд технологій БПЕ, що стрімко розвиваються і відрізняються між собою за технічною реалізацією систем БПЕ, вирішуваними ними задачами, діапазоном робочих частот та режимом роботи їх передавальних і приймальних підсистем. Це індукційний і резонансний способи передачі енергії, які знайшли широке застосування в безпровідній зарядці всіляких мобільних пристроїв, перетворення оптичного випромінювання в постійний струм з допомогою наноректен як альтернатива сонячним батареям і перетворення енергії навколишнього ЕМП, створюваного різними радіоелектронними системами (РЕС) в постійний струм для енергопостачання різних малопотужних пристроїв (наприклад, пристроїв, імплантованих у тіло людини). Слід зазначити, що в даний час виявляється підвищений інтерес і до створення РЕС нового класу в яких одночасно застосовуються технології БПЕ і безпровідного зв'язку.

Викладені в літературі результати багаточисленних досліджень в галузі БПЕ вказують на значимість проблеми, що розглядається в даній роботі та її зростаючий вплив на процес розвитку світової енергетики і процес створення РЕС нового покоління, систем зв'язку та систем технічного захисту інформації.

Аналіз опублікованих робіт показав, що сучасна теорія систем БПЕ заснована на використанні тих чи інших, зазвичай істотних, припущеннях. Це ускладнює виявлення загальних закономірностей, ускладнює можливість з'ясування всієї картини складних електромагнітних процесів, що відбуваються в системах БПЕ в цілому. При одних припущеннях системи БПЕ розглядаються як автономні передавальні та приймальні підсистеми для яких проводиться незалежний їх аналіз. У цьому випадку вплив виникаючих в передавальних антенах, наприклад, АФАР та ректенах нелінійних ефектів на зовнішні характеристики систем БПЕ в цілому вивчити не вдається. Також не вдається врахувати об'єктивно існуючий в системах БПЕ взаємний зв'язок процесів передачі, приймання та перетворення електромагнітної енергії в постійний струм, якщо ректена, наприклад, розміщується в ближній або проміжній зонах передавальної антени. При спільному функціонуванні систем БПЕ з іншими РЕС не враховується їхній електромагнітний зв'язок, тобто їх взаємний вплив один на одного. При підходах, що розвиваються в теперішній час, система БПЕ розгляда-

ється як єдине ціле, тобто передбачається, що приймальна підсистема може розташовуватися на довільній відстані відносно джерела електромагнітного випромінювання, таким чином, враховується взаємозв'язок процесів передачі та приймання електромагнітної енергії і характеристики каналу передачі електромагнітної енергії. Однак, при цьому розглядається тільки лінійний режим систем БПЕ, тобто процеси випромінювання, поширення та приймання ЕМП з урахуванням характеристик каналу поширення електромагнітної енергії та взаємного зв'язку випромінювачів передавальної та приймальної підсистем. Очевидний недолік такого підходу – неможливий аналіз виникаючих в системах БПЕ нелінійних ефектів в процесі перетворення електромагнітного випромінювання в постійний струм.

Також в літературі кожній технології безпроводної передачі енергії приділяється окрема увага, тобто не проглядається тенденція розвитку універсального підходу для аналізу систем БПЕ в яких можуть використовуватися будь-які технології передачі енергії. Така ситуація обмежує можливості при проектуванні перспективних систем БПЕ в яких поєднуються як різні технології передачі енергії так і технології одночасної передачі інформації і енергії.

З сказаного вище видно, що на сучасному етапі розвитку систем БПЕ складається протиріччя, яке з одного боку характеризується великим проривом в технологічних можливостях їх практичної реалізації, а з іншого, недостатньо розвиненими теоретичними підходами при їх проектуванні, що ґрунтуються на коректних математичних моделях і дозволяють на системному рівні проводити повний аналіз усієї сукупності електромагнітних процесів в системах БПЕ, до складу яких входять антени і тракти їх живлення з нелінійними характеристиками, причому при їх спільному функціонуванні з іншими РЕС.

З урахуванням вище викладеного, *науково-технічна проблема дисертації* формулюється як проблема створення і розвитку єдиного строгого підходу для вирішення задач всебічного аналізу і оптимізації систем БПЕ, в яких використовуються різні технології передачі енергії з врахуванням нелінійних властивостей їх компонентів.

Необхідність вирішення цієї проблеми є досить **актуальною**.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дослідження в дисертаційній роботі пов'язані з виконанням НДР у Харківському національному університеті радіоелектроніки (ХНУРЕ) в рамках держбюджетних тем:

- «Дослідження потенційних можливостей ефективного функціонування мережевих реконфігурованих інформаційно-вимірювальних систем екологічного моніторингу» підтема «Розробка методів моделювання інформаційних мереж побудованих на основі реконфігурованих антен» № ДР 0111U002903;

- «АРП» № ДР U0112000009т;

- «АРНІ» № ДР U0116000075т;

та у Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна:

- «Дослідження багатоелементних випромінюючих електродинамічних структур та двовимірних антенних решіток з нелінійними та імпедансними елементами» № ДР 0119U002522.

Перелічені НДР фінансовані і виконані за тематичними планами Міністерства

освіти і науки України, в проведенні яких здобувач брав участь як виконавець.

**Мета і задачі дослідження.** *Метою* дисертаційної роботи є розвиток загальної теорії систем БПЕ на базі комплексного підходу з використанням методів прикладної електродинаміки та схемотехніки, яка з єдиних позицій дозволяє проводити аналіз і оптимізацію різних за технологією передачі енергії систем БПЕ з нелінійними властивостями.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі основні *задачі* дослідження:

- провести аналіз сучасних рішень в галузі безпроводної передачі енергії як серед систем БПЕ в цілому, так і їх підсистем зокрема, ректен, та провести класифікацію систем БПЕ за різними ознаками;
- удосконалити існуючі та створити нові методики, моделі і алгоритми проектування, аналізу та оптимізації систем БПЕ з урахуванням всієї сукупності нелінійних ефектів, виникаючих в них, і електродинамічної взаємодії систем БПЕ між собою та з іншими РЕС;
- розробити алгоритм для розв’язання рівнянь стану систем БПЕ, що містять значну кількість нелінійних елементів, враховуючий специфіку побудови системи;
- отримати співвідношення для визначення зовнішніх параметрів систем БПЕ з урахуванням їх електродинамічної взаємодії з іншими РЕС;
- розвинути теорію передавальних багатовходових випромінювальних структур з нелінійними характеристиками в зоні Френеля;
- удосконалити способи технічної реалізації систем БПЕ з високими енергетичними характеристиками та розширеними функціональними можливостями;
- побудувати математичні моделі та розробити алгоритми проектування великоапертурних ректенних решіток при різних режимах їх збудження.

**Об’єктом дослідження** є процес випромінювання та перетворення електромагнітних полів у системах БПЕ.

**Предметом дослідження** є математичні моделі систем БПЕ, які забезпечують прийнятну для практики проектування точність аналізу показників якості досліджуваних систем.

**Методи дослідження.** У дисертаційній роботі було використано метод інтегральних рівнянь, математичні методи електродинаміки та теорії антен з нелінійними елементами, математичний апарат теорії НВЧ-кіл та багатополосників.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Основним науковим результатом дисертації є послідовний розвиток та апробація нових методів та комплексних підходів застосування яких, на відміну від відомих, дозволяє з єдиних позицій проводити аналіз та оптимізацію систем БПЕ в яких використовуються різні технології передачі електромагнітної енергії. Запропоновано розглядати всю систему БПЕ як єдину багатовходову антенну систему з нелінійними характеристиками.

1.1. Вперше розроблена нелінійна математична модель електродинамічного рівня системи БПЕ, яка використовує поєднання електродинамічного і схемотехнічного підходів та використовує поняття змінних стану. Розроблена нелінійна математична модель електродинамічного рівня системи БПЕ, на відміну від існуючих, відкриває нові широкі можливості щодо розвитку методів аналізу та

оптимізації систем БПЕ з наступних причин:

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

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

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

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

1.2. Отримано систему рівнянь стану та систему вихідних рівнянь, які на відміну від відомих, дозволяють при аналізі систем БПЕ враховувати притаманні їм нелінійні ефекти (утворення нових спектральних складових у відгуку системи БПЕ та залежність її характеристик від рівня вхідного впливу (внутрішньосистемні процеси) та зовнішнього впливу (міжсистемна взаємодія)).

1.3. Запропоновано новий ефективний дворівневий ітераційний алгоритм розв'язання системи рівнянь стану. Досліджено умови його збіжності і запропоновано модифікацію ітераційного процесу верхнього рівня, яка має збіжність за будь-яких параметрів лінійної та нелінійної підсхем системи БПЕ.

1.4. Отримані вирази для визначення зовнішніх параметрів систем БПЕ, які на відміну від відомих дозволяють коректно описувати внутрішньосистемні процеси та міжсистемну взаємодію (електродинамічний зв'язок з РЕС іншого призначення), з врахуванням всієї сукупності нелінійних ефектів виникаючих в досліджуваних системах.

1.5. Показано, що відомі лінійні математичні моделі систем БПЕ можуть розглядатися як окремий випадок розробленої нелінійної математичної моделі.

У рамках основного отримано ряд окремих нових наукових результатів.

2. Вперше узагальнена теорія багатовходових передавальних антенних систем з нелінійними характеристиками на зону Френеля, яка дозволяє на етапах моделювання систем БПЕ провести аналіз зовнішніх характеристик їх передавальних підсистем з урахуванням виникаючих в антенах і антенних трактах корисних та шкідливих нелінійних ефектів.

3. Обґрунтовано підхід побудови систем БПЕ сфокусованим мікрохвильовим променем до важкодоступних об'єктів, який відрізняється від традиційного використанням передавальної сфокусованої багатопозиційної системи випромінювачів (БСВ). У таких системах БПЕ на відміну від традиційних легко варіювати відстанню фокусування (дальністю передачі енергії), густиною потоку потужності в точці фокусування (на апертурі ректени) шляхом зміни геометричних розмірів БСВ і кількості в ній випромінювальних позицій, що істотно розширює

функціональні можливості систем БПЕ і галузі їх застосування.

4. Отримав подальший розвиток метод аналізу великоапертурних ректенних решіток (ВРР) при їх рівномірному збудженні. Отримано рівняння стану для нескінченної ректенної решітки. Вперше теоретично доведено, що розрахунок нелінійного режиму ВРР (в наближенні нескінченних решіток) зводиться до обчислення на основній частоті та частотах вищих гармонік параметрів одного еквівалентного приймально-випрямного елемента (ПВЕ) тільки в разі періодичного або майже періодичного режиму збудження ректени.

5. Розроблений алгоритм моделювання рівномірно збуджуваних ВРР, який на відміну від відомих, дозволяє враховувати конкретні параметри всіх лінійних і нелінійних елементів, що входять у ректену та ефективно проводити її проектування по заданих характеристиках.

6. Отримав подальший розвиток підхід для аналізу ВРР при нерівноамплітудному їх збудженні, достовірність якого, підтверджена шляхом порівняння теоретичних розрахунків з відомими експериментальними даними.

### **Практичне значення отриманих результатів**

1. Розроблені в дисертаційній роботі нові положення теорії систем БПЕ дозволяють підвищити ефективність проведення науково-дослідних робіт і дослідно-конструкторських робіт при реалізації нових великомасштабних проектів по БПЕ, модернізації існуючих систем БПЕ, створенні РЕС нового покоління в яких передбачається можливість інтеграції БПЕ з іншими функціональними можливостями і підвищити якісні результати їх розробок.

2. Отримані рішення задач теорії аналізу і моделювання систем БПЕ і їх підсистем дозволяють істотно скоротити обсяг експериментальних досліджень складних систем БПЕ, що дає можливість значно знизити витрати матеріальних ресурсів, грошових коштів і часу на їх технічну реалізацію.

3. Отримані теоретичні результати є певним вагомим внеском в загальну теорію РЕС, тому що розроблений підхід для аналізу та оптимізації систем БПЕ відрізняється широкими функціональними можливостями та універсальністю. Це дозволяє узагальнити його на інші РЕС (наприклад, системи МІМО) на етапі їхнього електродинамічного моделювання з подальшим уточненням зовнішніх характеристик для конкретних типів РЕС.

4. Запропоновано і обґрунтовано варіант практичної реалізації систем БПЕ в яких передавальна підсистема побудована на основі БСВ. У системах БПЕ з БСВ можливо при відносно невеликих потужностях випромінювання окремих позицій, отримувати необхідне високе значення густини потоку потужності в точці фокусування за рахунок збільшення числа позицій. Крім того, це дозволяє і зменшити для систем БПЕ з БСВ обмеження за розмірами зон безпеки для обслуговуючого персоналу і населення в порівнянні з необхідними розмірами та потужністю систем БПЕ з однопозиційними передавальними антенами для здійснення передачі енергії з тієї ж, що і для БСВ густиною потоку потужності ЕМВ і однакою відстані передачі енергії.

З точки зору якнайшвидшої практичної реалізації систем БПЕ на основі БСВ окремі їх позиції можна реалізувати, на основі морально застарілих РЛС з ФАР або

дзеркальними антенами з когерентними простими імпульсними або неперервними сигналами.

5. Розроблено підхід до аналізу ВРР, який дозволяє ефективно проводити їх моделювання як за допомогою оригінальних пакетів програм, розроблених в ХНУРЕ, так і за допомогою комерційних, які мають в своєму складі модулі електродинамічного та схемотехнічного моделювання.

6. На підставі розробленого алгоритму аналізу ВРР була проведена оцінка потенційних енергетичних характеристик ПВЕ в складі нескінченної ректенної решітки, за результатами якої вироблені практичні рекомендації щодо вибору випрямних діодів ПВЕ для досягнення максимально можливих значень ККД випрямлення.

7. На прикладі моделювання великоапертурної ректенної решітки (що опромінюється електромагнітним полем з суттєво нерівномірним амплітудним розподілом) у складі системи БПЕ з сфокусованою передавальною БСВ наведені практичні рекомендації щодо

- вибору конструкцій ПВЕ (їх випромінювачів та випрямних схем) для досягнення високих значень ККД випрямлення та потужності постійного струму у їх навантаженні;

- забезпечення режиму збудження ВРР для підвищення її результуючого ККД;

- алгоритмів побудови схем збору постійного струму ректен, які дозволяють підвищити результуючий ККД ректени.

8. Розроблені в дисертації методика, алгоритми аналізу і моделі антен з нелінійними елементами, зокрема ректен, використовувалися при виконанні наступних д/б НДР: «Дослідження потенційних можливостей ефективного функціонування мережевих реконфігурованих інформаційно-вимірювальних систем екологічного моніторингу» підтема «Розробка методів моделювання інформаційних мереж побудованих на основі реконфігурованих антен» № ДР 0111U002903 та у відкритих частинах НДР «АРП» № ДР U0112000009т й «АРНІ» № ДР U0116000075т.

Нелінійна математична модель електродинамічного рівня системи БПЕ до складу якої входять антени з нелінійними елементами використовувалась при виконанні д/б НДР «Дослідження багатоелементних випромінюючих електродинамічних структур та двовимірних антенних решіток з нелінійними та імпедансними елементами» № ДР 0119U002522

Матеріали дисертаційної роботи також впроваджені в освітній процес кафедри комп'ютерної радіоінженерії та систем технічного захисту інформації ХНУРЕ при підготовці і проведенні занять з дисциплін «Аналіз та оптимізація НВЧ структур», «Системи автоматизованого проектування», «Спеціальні розділи фізики». Отримані в дисертації результати використовувалися в дипломному проектуванні та при виконанні магістерських атестаційних робіт студентів.

Практичне значення отриманих результатів підтверджено актами про впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи, які знайшли відображення в пунктах наукової новизни та практичного значення, отримані автором самостійно. В роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача наступний.



У монографії [1] автору належить матеріал розділів 1.2, 2.1 – 2.3, 3.4, 6.1 – 6.5. У роботах [2, 10, 14, 18, 19, 23, 24] особистий внесок автора полягає в узагальненні світового досвіду досліджень ректен мікрохвильового діапазону, ректен оптичного діапазону (наноректен), систем БПЕ різного класу і призначення і електродинамічних пристроїв з нелінійними характеристиками, нелінійних ефектів, що виникають в телекомунікаційних системах, постановці задач їх подальшого дослідження та підготовці до публікації. У роботі [3] автором вирішувалися завдання синтезу поля на апертурі ректени близького до рівномірного і моделювання її характеристик при такому збудженні. У роботах [4, 25] автором проведено чисельні дослідження впливу нелінійності поверхневого імпедансу на вхідний опір симетричних і несиметричних випромінювачів. В [11] провідна участь у постановці задачі дослідження і викладенні методу її вирішення, розробці методики чисельного розрахунку ПВЕ великоапертурних ректен, проведенні чисельних їх розрахунків і аналізу отриманих результатів. В [6 – 9, 27 – 29] провідна участь в розробці фізичних і математичних моделей систем БПЕ на основі БСВ, а саме обчислювальних алгоритмів для розрахунку сфокусованих ЕМП на апертурі ректени і їх програмної реалізації; розробці рекомендацій щодо конструктивного виконання ректен систем БПЕ на основі БСВ і їх моделювання; науковій оцінці отриманих результатів і в формулюванні висновків. В [22, 26, 30] у науковому керівництві, моделюванні ПВЕ ВРР й аналізу отриманих результатів. В [12, 31] у постановці задачі дослідження, розробці математичної моделі БСВ при фокусуванні ЕМВ в рухому точку і її програмна реалізація. В [13] у розробці і тестуванні алгоритмів і програм, проведенні досліджень залежності власного і взаємного опору від відстані, зсуву і різної орієнтації вуглецевих нанотрубок одна відносно іншої. В [15, 32] внесок автора полягає в постановці задач дослідження, обґрунтуванні методів дослідження, отриманні аналітичних рішень, розробці підходу до аналізу ВРР. В [16, 17, 33] у постановці задач досліджень, розробці алгоритмів і програм розрахунку сфокусованих ЕМП ФАР і БСВ. В [20, 35 – 38] особистий внесок автора полягає в постановці задач досліджень, проведенні класифікації систем БПЕ, розробці та розвитку методів і підходів аналізу і оптимізації систем БПЕ, отриманні аналітичних рішень, участь в обговоренні результатів та формулюванні висновків. В [39] моделювання широкосмугової антени. В [40] у постановці задачі дослідження систем БПЕ побудованих на основі БСВ, моделюванні поля на апертурі ректени і розрахунку її характеристик. Розробці рекомендацій щодо побудови схем збору потужності постійного струму ректен, які опромінюються нерівномірним полем. В [41] в обґрунтуванні можливості застосування нелінійної математичної моделі електродинамічного рівня системи БПЕ для вирішення окремих задач, а саме задач аналізу виникаючих нелінійних ефектів в передавальних підсистемах систем БПЕ до складу яких входять антени з розподіленою нелінійністю. Автором отримані нелінійні інтегральні рівняння відносно розподілу комплексних амплітуд густини струму на поверхнях випромінювачів.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи були представлені та обговорені на міжнародних науково-технічних конференціях та семінарах: V, VIII International Conference on Antenna Theory and Techniques (Kiev, 2005, 2011); Молодь і сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій (Севастополь, 2006); Modern problems of Radio Engineering, Telecommunica-

tions and Computer Science (Lviv, 2006, 2012); Наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба (Харків, 2007); Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку (Харків, 2011); Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (Sevastopol, 2012); IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (Odessa, 2013); X International Conference on Antenna Theory and Techniques (Kharkiv, 2015); XXI, XXIII, XXV International seminar/workshop on direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic wave theory (Tbilisi, 2016, 2018, 2020); XXII International seminar/workshop on direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic wave theory (Dnipro, 2017); 14<sup>th</sup> International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (Lviv, 2018); 2<sup>nd</sup> Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (Lviv, 2019); IV International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (Odessa, 2019); XXIV<sup>th</sup> International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (Lviv, 2019); 15<sup>th</sup> International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (Lviv, 2020); IEEE Ukrainian Microwave Week (Kharkiv, 2020).

**Публікації за темою дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи відображені в 1 монографії та 40 наукових роботах, серед них: 20 статей, опублікованих у збірниках наукових праць, які входять до переліку видань, дозволених МОН України для публікацій результатів досліджень з технічних наук, 20 тез науково-технічних конференцій і семінарів (2 з них представлені на пленарних засіданнях). 20 робіт індексуються в наукометричній базі Scopus.

Також здобувач є співавтором 3 підручників [42 – 44] з грифом МОН України.

**Структура і обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний об'єм дисертації – 314 сторінок, в тому числі 98 рисунка, 6 таблиць, 303 джерела на 32 сторінках, 3 додатки на 15 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дисертації подана загальна характеристика роботи, обґрунтовується актуальність теми дослідження, вказується на зв'язок роботи з науковими програмами і темами, формулюється мета та задачі дослідження, вказується об'єкт, предмет та методи досліджень, відзначається наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок автора в роботах, виконаних у співавторстві, апробація результатів дисертації та відомості про публікації за темою дисертації.

У **першому розділі** “Стан теоретичних та експериментальних досліджень в галузі безпровідної передачі енергії” проведено аналіз сучасного стану, тенденцій розвитку систем БПЕ та основних вимог до них. У першій частині розділу наведена коротка характеристика способів безпровідної передачі енергії. У другій частині розділу проведено змістовний огляд галузей застосування і перспектив розвитку систем БПЕ різного призначення і класу. Вказується, що розвиток таких систем відбувається в декількох напрямках, кожний з них є перспективним і претендує на вирішення широкого кола актуальних практичних завдань. В третій частині розділу, на-

водяться основні відомості про технічні рішення ректен систем БПЕ, які використовують різні технології передачі енергії. Четверта частина розділу присвячена викладенню основних результатів багаторічних досліджень в галузі БПЕ отриманих в ХНУРЕ. У п'ятій частині розділу, як підсумок проведеного літературного огляду, запропоновано варіант класифікації систем БПЕ по фізичному принципу дії, основним конструктивним, технологічним і експлуатаційним ознакам. Зроблено висновок, що до теперішнього часу в галузі БПЕ зроблено чимало, технічний рівень розробок у цій галузі досить високий, що підсилює її вплив не тільки на процес розвитку світової екологічно чистої енергетики, а й на процес створення багатофункціональних РЕС нових поколінь. Проте, незважаючи на значні досягнення в напрямку БПЕ, усе ще багато питань перебувають у стадії досліджень. Деякі з цих питань, які підлягають першочерговому вирішенню були сформульовані в задачах дисертаційних досліджень.

**Другий розділ** “Нелінійна електродинамічна модель систем безпровідної передачі енергії” присвячено розробці універсальної математичної моделі систем БПЕ, яка ґрунтується на моделі антен з нелінійними елементами (АНЕ), що складається з лінійних (ЛБ) та нелінійних (НБ) багатополіусників.

У *підрозд. 2.1.* сформульовані етапи побудови нелінійної математичної моделі електродинамічного рівня системи БПЕ.

1. Вибір структурної схеми системи БПЕ.

2. Вибір моделей лінійних і нелінійних компонентів (формування компонентних рівнянь) і вибір вектора змінних стану та вектора вихідних параметрів системи БПЕ.

3 Формування рівнянь стану та вихідних рівнянь системи БПЕ.

4. Розв'язок системи рівнянь стану, у результаті чого визначається вектор змінних стану.

5. Визначення зовнішніх характеристик системи БПЕ.

У другому розділі послідовно викладені перші три етапи.

У *підрозд. 2.2.* розглянута система БПЕ в якій передавальна та приймальна підсистеми мають довільні конфігурації і до їх складу входять антени та тракти їх живлення з НЕ. Зазначено, що в передавальній (Т) та приймальній (R) підсистемах системи БПЕ можна виділити нелінійні підсхеми (НПС), лінійні підсхеми (ЛПС), випромінювальні структури (ВС), генератори та навантаження. Далі у *підрозд. 2.3* показано, що систему БПЕ довільної конфігурації можна уявити як АНЕ. Для цього нелінійні підсхеми передавальної підсистеми  $НПС_T$  і приймальної підсистеми  $НПС_R$  було об'єднано в нелінійну підсхему  $НПС_{TR}$ , яку названо нелінійною підсхемою системи БПЕ (рис. 1). Лінійні підсхеми передавальної підсистеми  $ЛПС_T$  і приймальної підсистеми  $ЛПС_R$  об'єднано в лінійну підсхему  $ЛПС_{TR}$  системи БПЕ. Випромінювальну структуру передавальної підсистеми  $ВС_T$ , систему розсіювачів (Р) і  $ВС_R$  ректени об'єднано в підсхему  $ВС_{TR}$  – випромінювальну структуру системи БПЕ, а джерела (генератори) і навантаження в підсхему, яку названо зовнішні пристрої ( $ЗП_{TR}$ ) системи БПЕ. Кожній підсхемі у відповідність були поставлені відповідні ЛБ та НБ. Для більш повного опису системи БПЕ з погляду її електродинамічної взаємодії з іншими РЕС (міжсистемна взаємодія) на рис. 1

виділені додаткові групи входів (перетини  $\delta'_T - \delta'_T$  й  $\delta'_R - \delta'_R$ ) по яких і враховується ця міжсистемна взаємодія.

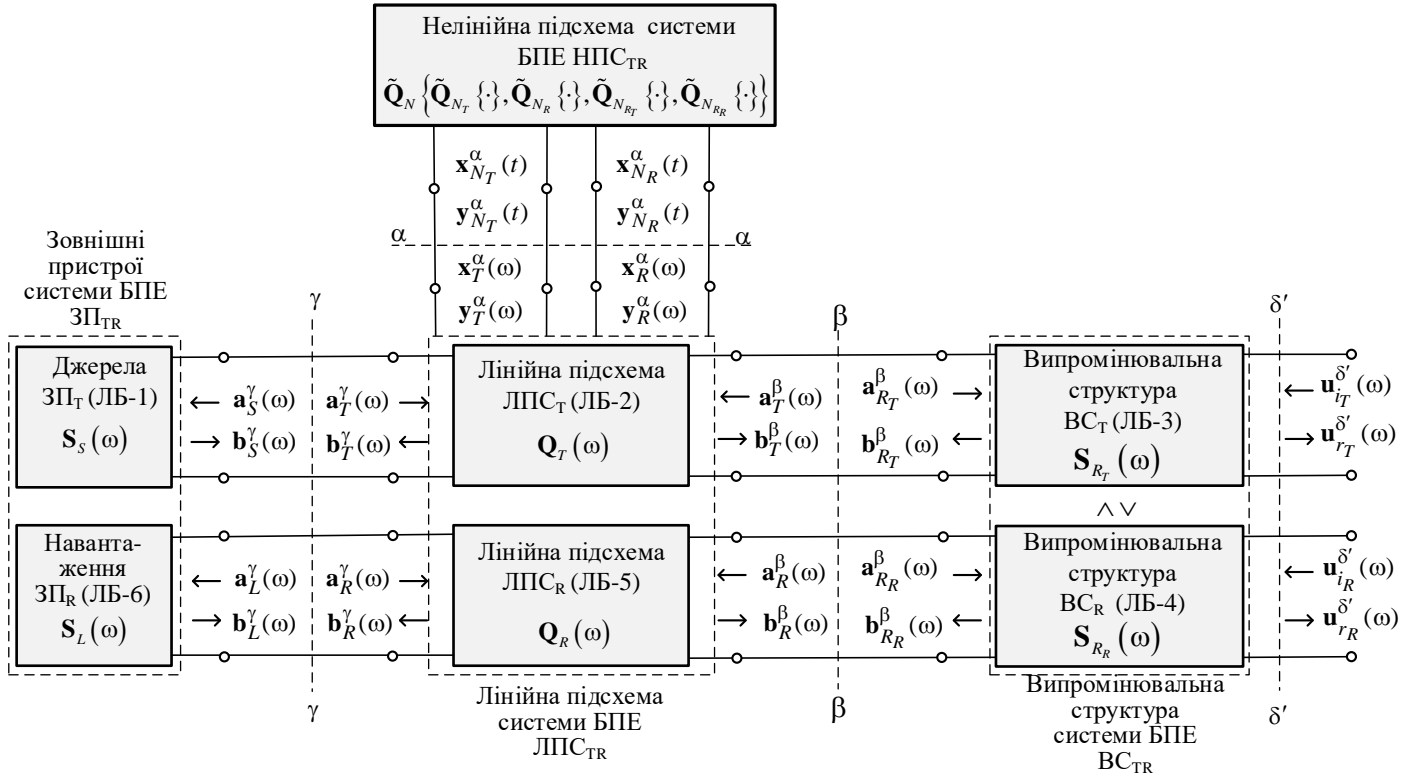


Рис. 1. Структурна схема системи БПЕ

Символом  $\wedge \vee$  відзначена та обставина, що при об'єднанні в один багатополюсник  $\mathbf{V}_{S_T}$  і  $\mathbf{V}_{S_R}$  та розсіювачів взаємний зв'язок між ними враховується в параметрах (компонентних рівняннях) об'єданого багатополюсника  $\mathbf{V}_{S_{TR}}$ .

У підрозділі обґрунтовано, що з метою створення узагальненої моделі системи БПЕ режими входів нелінійного багатополюсника доцільно описувати в часовій області як векторами струмів  $\mathbf{i}_{N_{**}}^\alpha(t)$  і напруг  $\mathbf{u}_{N_{**}}^\alpha(t)$ , так і векторами падаючих  $\mathbf{a}_{N_{**}}^\alpha(t)$  та відбитих  $\mathbf{b}_{N_{**}}^\alpha(t)$  хвиль. Тому до розгляду введені узагальнені вектори (рис. 1 перетин  $\alpha - \alpha$ )

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

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

Враховуючи вище сказане та умови з'єднання в перетинах  $\beta - \beta$  і  $\gamma - \gamma$  система БПЕ була подана у вигляді багатовходової АНЕ (рис. 2).

Нелінійна підсхема НПСТР системи БПЕ описується в часовій області нелінійним діагональним матричним оператором

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

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

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

де  $**$  відповідає  $T$  або  $R$ ;  $\text{diag} \{\cdot\}$  – діагональна матриця,  $\tilde{\mathbf{G}}_N \{\cdot\}, \tilde{\mathbf{R}}_N \{\cdot\}, \tilde{\mathbf{S}}_N \{\cdot\}$  – нелінійні оператори, що задають зв'язок між вхідними впливами (відповідно напругами, струмами, падаючими хвилями) і відгуками (струмами, напругами, відбитими хвилями, відповідно) на входах НБ (НПС<sub>TR</sub>).

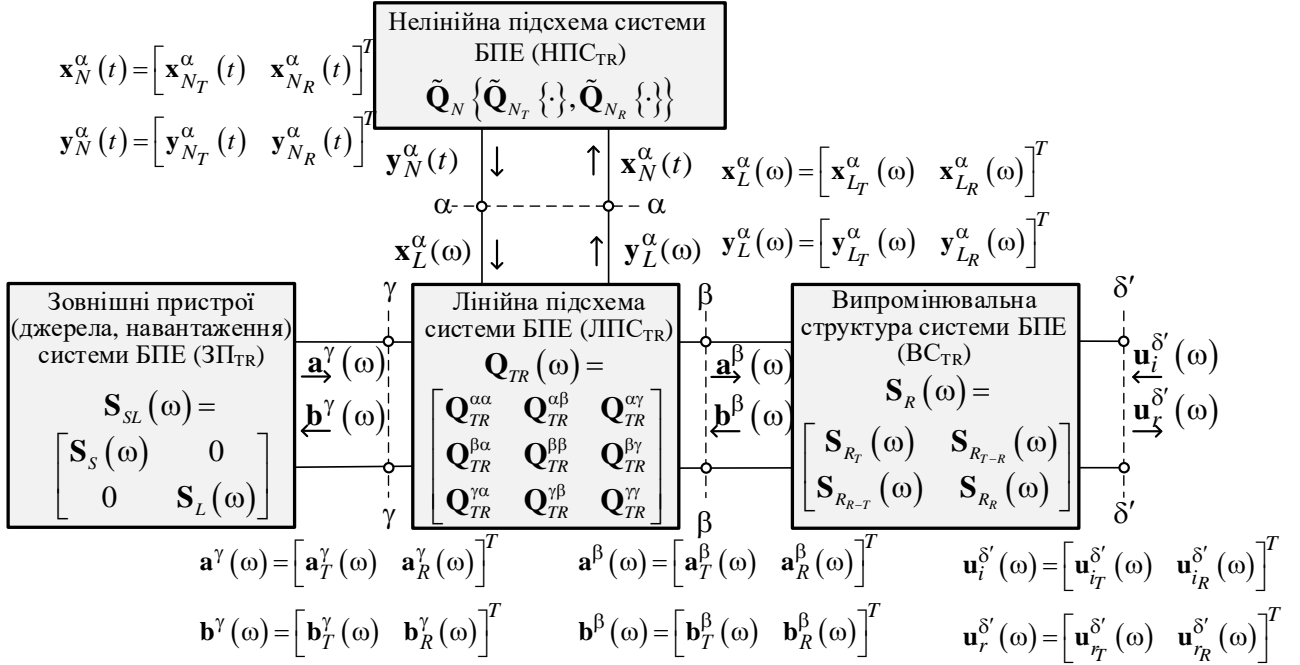


Рис. 2. Подання системи БПЕ у вигляді багатовходової АНЕ

Зовнішні параметри НПС<sub>TR</sub> пов'язані системою компонентних рівнянь.

$$\mathbf{y}_N^\alpha(t) = \tilde{\mathbf{Q}}_N \{\mathbf{x}_N^\alpha(t)\}. \quad (1)$$

Багатополюсник зовнішніх пристроїв системи БПЕ ЗП<sub>TR</sub> характеризується блоковою матрицею розсіяння  $\mathbf{S}_{SL}(\omega)$  (рис. 2). Багатополюсник ЛПС<sub>TR</sub> зручно описувати блоковою змішаною матрицею  $\mathbf{Q}_{TR}(\omega)$ , тому що режими входів багатополюсника ЛПС<sub>TR</sub>, який з'єднується, відповідно, із багатополюсниками ЗП<sub>TR</sub>, ВС<sub>TR</sub> і нелінійним багатополюсником НПС<sub>TR</sub> (рис. 2) доцільно характеризувати векторами, аналогічними тим, які характеризують режими відповідних входів приєднаних до нього багатополюсників. Багатополюсник ВС<sub>TR</sub> описується блоковою матрицею розсіяння  $\mathbf{S}_R(\omega)$  (рис. 2), яка пов'язує падаючі та відбиті хвилі в перерізі  $\beta - \beta$  (внутрішньосистемна взаємодія) й амплітуди збіжних та розбіжних хвиль у каналах вільного простору в перерізі  $\delta' - \delta'$ . Вектори  $\mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega)$  та  $\mathbf{u}_r^{\delta'}(\omega)^T$  є комплексними амплітудами сферичних взаємоортогональних типів хвиль за допомогою яких досліджувана система БПЕ взаємодіє з іншими системами (міжсистемна взаємодія).

У підрозд. 2.4 розглянуто виведення рівнянь стану та вихідних рівнянь системи БПЕ. Зазначається, що найдоцільніше вектором змінних стану вибрати один з векторів, які описують режими входів ЛПС<sub>TR</sub>, з'єднаних з НПС<sub>TR</sub>, тобто або вектор  $\mathbf{x}_L^\alpha(\omega)$ , або вектор  $\mathbf{y}_L^\alpha(\omega)$ . З точки зору аналізу системи БПЕ вибір  $\mathbf{x}_L^\alpha(\omega)$  або  $\mathbf{y}_L^\alpha(\omega)$ , як вектора змінних стану, є цілком рівноправним, тому що і той і другий ве-

ктори, по-перше, однозначно визначають режим входів у перерізі  $\alpha - \alpha$ , і, по-друге, знаючи один з цих векторів, можна визначити режим усієї системи БПЕ, тобто режими у перерізах  $\beta - \beta$ ,  $\gamma - \gamma$ ,  $\delta - \delta$  (рис. 2). При такому виборі змінних стану на етапі складання рівнянь стану всю лінійну підсхему системи БПЕ досить описати лише відносно перерізів  $\alpha - \alpha$ .

Далі з врахуванням (1) та умов з'єднання у перетині  $\alpha - \alpha$ , отримано рівняння стану системи БПЕ в часовій області:

$$\mathbf{y}_L^\alpha(t) = \tilde{\mathbf{Q}}_N \{ \mathbf{x}_L^\alpha(t) \} \text{ або } \mathbf{x}_L^\alpha(t) = \tilde{\mathbf{Q}}_N^{-1} \{ \mathbf{y}_L^\alpha(t) \}, \quad (2)$$

де

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

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

В ході одержання рівнянь стану (2), жодних обмежень (окрім режиму збудження) не вводилося. Тому отримані рівняння стану дають змогу описати притаманні системам БПЕ нелінійні ефекти, зв'язані з утворенням у їх відгуку нових спектральних складових із частотами  $\nu_n \neq \omega_k$  ( $k = 0, q$ ), відмінними від частот входних впливів  $\omega_k$ , а також нелінійну залежність вектора змінних стану  $\mathbf{x}_L^\alpha(\omega)$  від рівня входних впливів.

Далі у підрозділі була отримана система вихідних рівнянь системи БПЕ

$$\begin{bmatrix} \mathbf{b}^\gamma(\nu_n) \\ \mathbf{u}_r^{\delta'}(\nu_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\alpha}(\nu_n) & \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\gamma}(\nu_n) & \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\delta'}(\nu_n) \\ \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\alpha}(\nu_n) & \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\gamma}(\nu_n) & \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\delta'}(\nu_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_L^\alpha(\nu_n) \\ \mathbf{a}^\gamma(\omega_k) \\ \mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega_k) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Знаючи вектор входних параметрів системи БПЕ, можна визначити всі її зовнішні параметри.

У **третьому розділі** “Матриця розсіяння випромінювальної структури системи БПЕ”, отримані співвідношення для обчислення блоків матриці розсіяння випромінювальної структури системи БПЕ. Перш ніж перейти до визначення блоків матриці розсіяння, у підрозд. 3.1 визначено їх фізичний зміст, стосовно системи БПЕ.

Блок  $\mathbf{S}_{R_T}(\nu_n)$  матриці розсіяння  $\mathbf{S}_R(\nu_n)$  (рис. 2) описує внутрішньосистемні процеси й має наступну структуру

$$\mathbf{S}_{R_T}(\nu_n) = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{R_T}^T(\nu_n) & \mathbf{S}_{R_T}^{TR}(\nu_n) \\ \mathbf{S}_{R_T}^{RT}(\nu_n) & \mathbf{S}_{R_T}^R(\nu_n) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де  $\mathbf{S}_{R_T}^T(\nu_n)$  – квадратний блок розмірністю  $N_T \times N_T$  описує передачу потужності між входами випромінювачів передавальної антенної системи;  $\mathbf{S}_{R_T}^R(\nu_n)$  – квадратний блок розмірністю  $N_R \times N_R$  описує передачу потужності між входами випромінюва-

чів ректенної решітки;  $\mathbf{S}_{R_T}^{TR}(\mathbf{v}_n)$  – блок розмірністю  $N_T \times N_R$  описує передачу перевипроміненої потужності від ректени до передавальної антени;  $\mathbf{S}_{R_T}^{RT}(\mathbf{v}_n)$  – блок розмірністю  $N_R \times N_T$  описує передачу потужності від передавальної антени до ректени.

Блок  $\mathbf{S}_{R_{R-T}}(\mathbf{v}_n)$  (рис.2) має наступну структуру

$$\mathbf{S}_{R_{R-T}}(\mathbf{v}_n) = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{R_{R-T}}^T(\mathbf{v}_n) & \mathbf{S}_{R_{R-T}}^R(\mathbf{v}_n) \end{bmatrix},$$

де  $\mathbf{S}_{R_{R-T}}^T(\mathbf{v}_n)$  – блок розмірністю  $N_T \times N_T$  визначає поле випромінюване системою БПЕ при різних розподілах збудження випромінювачів передавальної антенної системи;  $\mathbf{S}_{R_{R-T}}^R(\mathbf{v}_n)$  – блок розмірністю  $N_R \times N_R$  визначає поле випромінюване системою БПЕ при різних розподілах збудження багатовходової ректенної решітки.

При цьому слід зауважити, що поле випромінювання системи БПЕ при збудженні передавальної решітки визначається з врахуванням впливу на неї з боку ректенної решітки і навпаки – поле випромінювання системи БПЕ при збудженні багатовходової ректенної решітки визначається з врахуванням впливу на неї передавальної антени.

Блок  $\mathbf{S}_{R_{T-R}}(\mathbf{v}_n)$  має наступну структуру

$$\mathbf{S}_{R_{T-R}}(\mathbf{v}_n) = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{R_{T-R}}^T(\mathbf{v}_n) & \mathbf{S}_{R_{T-R}}^R(\mathbf{v}_n) \end{bmatrix}^T,$$

де  $\mathbf{S}_{R_{T-R}}^T(\mathbf{v}_n)$  – блок розмірністю  $N_T \times N_T$  характеризує реакцію передавальної антенної решітки на зовнішній позасистемний вплив;  $\mathbf{S}_{R_{T-R}}^R(\mathbf{v}_n)$  – блок розмірністю  $N_R \times N_R$  характеризує реакцію ректени на зовнішній позасистемний вплив.

Блок  $\mathbf{S}_{R_R}(\mathbf{v}_n)$  (рис. 2) розмірністю  $N_T \times N_R$  визначає структуру поля, перевипроміненого передавальною антенною системою та ректеною системи БПЕ для різних падаючих ортогональних сферичних хвиль, які приходять від віддалених джерел (міжсистемна взаємодія).

Для визначення блоку матриці розсіяння випромінювальної структури системи БПЕ, що описує внутрішньосистемні процеси в *підрозд. 3.2* використано метод

інтегральних рівнянь. Для системи випромінювачів  $S = \bigcup_{i=1}^N S_i$  до складу яких входять

лінійні та нелінійні елементи з зосередженими параметрами, для сталого періодичного або майже-періодичного режиму отримано систему нелінійних інтегральних рівнянь (НІР) (компонентні рівняння системи випромінювачів).

Для розв'язку отриманої системи НІР було застосовано метод Гальоркіна. На відміну від випадку розв'язку лінійних інтегральних рівнянь, для апроксимації шуканого розподілу струму  $\vec{J}^e(\vec{r}'_i, \mathbf{v}_n)$  в лінійному операторі і операторі поверхневого імпедансу необхідно використовувати різні системи базисних функцій:  $\{\psi_n^{(L)}(\vec{r}'_i, \mathbf{v}_n)\}$  і  $\{\psi_n^{(N)}(\vec{r}'_i, \mathbf{v}_n)\}$ , відповідно. Індекс "N" відноситься до базисних функцій оператора поверхневого імпедансу підкреслює ту обставину, що в загальному випадку це нелінійний оператор. В результаті отримана система

нелінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих амплітуд комбінаційних складових розподілу густини струму на поверхні провідників структури.

$$\mathbf{Z}(\mathbf{v}_n)\mathbf{J}(\mathbf{v}_n) + \mathfrak{N}[\vec{j}(\vec{r}, t)] = \mathbf{U}_m^{\text{ct}}(\mathbf{v}_n) \quad \forall n = \overline{-N, N}, \quad (5)$$

$$\text{де } \mathbf{Z}(\mathbf{v}_i) = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}^{xx}(\mathbf{v}_n) & \mathbf{Z}^{xy}(\mathbf{v}_n) \\ \mathbf{Z}^{yx}(\mathbf{v}_n) & \mathbf{Z}^{yy}(\mathbf{v}_n) \end{bmatrix}; \quad \widehat{\mathfrak{N}}[\vec{j}(\vec{r}, t)] = \begin{bmatrix} \mathfrak{N}_x[\vec{j}(\vec{r}, t)] \\ \mathfrak{N}_y[\vec{j}(\vec{r}, t)] \end{bmatrix}; \quad \mathbf{U}^{\text{ct}}(\mathbf{v}_i) = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_x^{\text{ct}}(\mathbf{v}_n) \\ \mathbf{U}_y^{\text{ct}}(\mathbf{v}_n) \end{bmatrix}.$$

Елементи матриць та векторів в (5) визначаються наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} Z_{mn}^{\alpha\beta} &= \iint_S \Psi_{xm}^{(L)}(\vec{r}, \mathbf{v}_n) \left\{ \vec{n}_p \times \iint_S \left\{ -jv_n \mu \Psi_{xn}^{(L)}(\vec{r}', \mathbf{v}_n) G_n(\vec{r}, \vec{r}') + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{jv_n \epsilon} \text{grad}_p \text{div}_p (\Psi_{xn}^{(L)}(\vec{r}', \mathbf{v}_n) G_n(\vec{r}, \vec{r}')) \right\} d|\vec{r}'| d|\vec{r}|, \right. \\ &\quad \left. \alpha = x, y; \quad \beta = x, y; \right. \\ &\quad \mathfrak{N}_{(m,n)(x,y)}[\vec{j}(\vec{r}, t)] = -\iint_S \Psi_{(x,y)m}^{(N)}(\vec{r}, \mathbf{v}_n) \times \\ &\quad \times \left\{ \vec{n}_p \times \iint_S \text{rot}_p \left\{ \mathfrak{Z}_n \left\{ \widehat{\mathbf{Z}}_N \left[ \sum_{n=-M}^M \delta_n \vec{J}^e(\vec{r}', \mathbf{v}_n) e^{jv_n t} \right] \right\} G_n(\vec{r}, \vec{r}') \right\}_{(x,y)} \right\} d|\vec{r}'| d|\vec{r}|; \\ &\quad U_{m(x,y)}^{\text{ct}}(\mathbf{v}_n) = \iint_S \Psi_{xm}^{(L)}(\vec{r}, \mathbf{v}_n) E_{x,y}^{\text{ct}}(\vec{r}, \mathbf{v}_n) d|\vec{r}|. \end{aligned}$$

Тут  $\vec{n}_p$  – орт зовнішньої нормалі до поверхні  $S_i$  в точці  $p$ ,  $\vec{J}^e(\vec{r}', \mathbf{v}_n)$  – комплексна амплітуда розподілу густини поверхневого електричного струму з частотою  $v_n$  на  $i$ -му випромінювачі;  $G_n(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{e^{-jk_n|\vec{r}-\vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|}$  – функція Гріна вільного простору;  $k_n = v_n/c$  – хвильовий коефіцієнт;  $M$  – число комбінаційних частот, що враховуються при розв'язку НІР;  $\mathfrak{Z}_n\{\cdot\}$  – оператор перетворення Фур'є, визначений наступним чином  $\mathfrak{Z}\{\vec{y}_0(t)\} = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[ \frac{1}{T} \int_{-T}^T \vec{y}_0(t) e^{-jv_n t} dt \right]$ ,  $\delta_n = 1$ , якщо  $v_n = 0$  і,  $\delta_n = 1/2$  якщо  $v_n \neq 0$ .

Система (5) є системою рівнянь гармонійного балансу для нелінійного кола, що являє собою з'єднання нелінійного багатополосника, описуваного матричним оператором  $\widehat{\mathfrak{N}}[\vec{j}(\vec{r}, t)]$ , лінійного багатополосника, описуваного матрицею власних і взаємних опорів  $\mathbf{Z}(\mathbf{v}_n)$  і системою незалежних джерел, описуваних вектором  $\mathbf{U}^{\text{ct}}(\mathbf{v}_n)$ .

Далі результат розв'язку НІР конкретизувався на випадок системи БПЕ і приводився до вигляду, потрібного для визначення шуканого блоку матриці розсіяння випромінювальної структури системи БПЕ. Для цього в операторі поверхневого імпедансу виділено лінійну частину, яка характеризує розподілені його властивості



$$\mathfrak{K}[\vec{j}(\vec{r}, t)] = \tilde{\mathbf{Z}}(\mathbf{v}_n) \vec{J}(\mathbf{v}_n) + \tilde{\mathfrak{K}}[\vec{j}(\vec{r}, t)]$$

і співвідношення (5) було переписано наступним чином:

$$(\mathbf{Z}(\mathbf{v}_n) + \tilde{\mathbf{Z}}(\mathbf{v}_n)) \mathbf{J}(\mathbf{v}_n) = \mathbf{U}^{\text{ct}}(\mathbf{v}_n) - \tilde{\mathfrak{K}}[\vec{j}(\vec{r}, t)] \quad \forall n = \overline{-N, N}. \quad (6)$$

В (6) матриця  $\mathbf{Z}(\mathbf{v}_n) + \tilde{\mathbf{Z}}(\mathbf{v}_n)$  характеризує розподілені властивості випромінювальної структури, елементи вектора  $\mathbf{U}^{\text{ct}}(\mathbf{v}_n)$  являють собою комплексні амплітуди джерел збудження, які безпосередньо підключені до входів випромінювальної структури, елементи вектора  $\tilde{\mathfrak{K}}[\vec{j}(\vec{r}, t)]$  характеризують лінійні та нелінійні елементи з зосередженими параметрами, які входять до складу випромінювальної структури. Згідно теореми Тевенена вектор  $\tilde{\mathfrak{K}}[\vec{j}(\vec{r}, t)]$  можна трактувати як додаткові джерела збудження випромінювальної структури  $\mathbf{U}_{\text{add}}^{\text{ct}}(\mathbf{v}_n)$ . Позначимо

$\tilde{\mathbf{Z}}(\mathbf{v}_n) = \mathbf{Z}(\mathbf{v}_n) + \tilde{\mathbf{Z}}(\mathbf{v}_n)$ ,  $\tilde{\mathbf{U}}^{\text{ct}}(\mathbf{v}_n) = \mathbf{U}^{\text{ct}}(\mathbf{v}_n) + \mathbf{U}_{\text{add}}^{\text{ct}}(\mathbf{v}_n)$ . Тоді (6) прийме вид:

$$\tilde{\mathbf{Z}}(\mathbf{v}_n) \mathbf{J}(\mathbf{v}_n) = \tilde{\mathbf{U}}^{\text{ct}}(\mathbf{v}_n) \quad \forall n = \overline{-N, N}. \quad (7)$$

Для узагальненої нелінійної схеми БПЕ система рівнянь (7) означає, що всі елементи з нелінійними властивостями є елементами з зосередженими параметрами і тому вони були виділені в окремий НБ. Якщо в випромінювальну структуру включено ще і лінійні елементи з зосередженими параметрами, то вони також виділені і віднесені до складу лінійного багатополюсника ЛПС<sub>TR</sub> (рис. 2). Це означає, що число входів випромінювальної структури, за допомогою яких вона з'єднується з ЛПС<sub>TR</sub> визначається як числом реальних навантажень та генераторів системи, так і числом додаткових входів, які призначені для з'єднання безпосередньо включених в випромінювальну структуру зосереджених елементів (лінійних і нелінійних) з лінійною підсхемою.

Перш ніж перейти до визначення матриці розсіяння випромінювальної структури, була одержана матриця власних та взаємних опорів відносно входів випромінювальної структури.

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Z}}_{11}(\mathbf{v}_n) & \tilde{\mathbf{Z}}_{12}(\mathbf{v}_n) \\ \tilde{\mathbf{Z}}_{21}(\mathbf{v}_n) & \tilde{\mathbf{Z}}_{22}(\mathbf{v}_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\mathbf{v}_n) \\ \mathbf{J}_2(\mathbf{v}_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{U}}_1^{\text{ct}}(\mathbf{v}_n) \\ \tilde{\mathbf{U}}_2^{\text{ct}}(\mathbf{v}_n) \end{bmatrix} \quad (8)$$

В (8) у блоках  $\mathbf{J}_1(\mathbf{v}_n)$ ,  $\tilde{\mathbf{U}}_1^{\text{ct}}(\mathbf{v}_n)$  і  $\tilde{\mathbf{Z}}_{11}(\mathbf{v}_n)$  згруповані величини, що відносяться до елементарних сегментів, клеми яких збігаються з  $N_{\text{rad}}$  входами самої випромінювальної структури.

Матриця власних та взаємних імпедансів відносно входів випромінювальної структури визначається наступним чином:

$$\tilde{\mathbf{Z}}(\mathbf{v}_n) = \tilde{\mathbf{Z}}_{11}(\mathbf{v}_n) - \tilde{\mathbf{Z}}_{12}(\mathbf{v}_n) \tilde{\mathbf{Z}}_{22}^{-1}(\mathbf{v}_n) \tilde{\mathbf{Z}}_{21}(\mathbf{v}_n). \quad (9)$$

Блок  $\mathbf{S}_{R_r}(\mathbf{v}_n)$ , що описує внутрішньосистемну взаємодію, визначається з розв'язку НІР після обчислення матриці власних і взаємних опорів  $\tilde{\mathbf{Z}}(\mathbf{v}_n)$  (9) за відомим співвідношенням

$$\mathbf{S}_{R_T}(\mathbf{v}_n) = (\tilde{\mathbf{Z}}(\mathbf{v}_n) - \mathbf{E})(\tilde{\mathbf{Z}}(\mathbf{v}_n) + \mathbf{E})^{-1}.$$

Блоки матриці розсіювання, що описують міжсистемну взаємодію, були визначені через блок  $\mathbf{S}_{R_T}(\mathbf{v}_n)$  та ортонормовані функції спрямованості  $\vec{\mathbf{e}}(\mathbf{v}_n, \theta, \varphi)$  у підрозд. 3.3. Кожній функції  $\vec{\mathbf{e}}_l(\mathbf{v}_n, \theta, \varphi)$  відповідає певний вектор  $\mathbf{a}_l''(\mathbf{v}_n) = [a_{1l}''(\mathbf{v}_n), a_{2l}''(\mathbf{v}_n), \dots, a_{N_{\delta}l}''(\mathbf{v}_n)]^T$ , що характеризує розподіл падаючих хвиль на входах випромінювача, необхідний для створення  $\vec{\mathbf{e}}_l(\mathbf{v}_n, \theta, \varphi)$ . Сукупність векторів  $\mathbf{a}_l''(\mathbf{v}_n)$ ,  $\forall l = \overline{1, N_{\delta}}$  можна записати у вигляді квадратної ортогоналізуючої матриці падаючих хвиль

$$\mathbf{A}(\mathbf{v}_n) = \begin{bmatrix} a_{11}''(\mathbf{v}_n) & a_{12}''(\mathbf{v}_n) & \dots & a_{1N_{\delta}}''(\mathbf{v}_n) \\ a_{21}''(\mathbf{v}_n) & a_{22}''(\mathbf{v}_n) & \dots & a_{2N_{\delta}}''(\mathbf{v}_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N_{\delta}1}''(\mathbf{v}_n) & a_{N_{\delta}2}''(\mathbf{v}_n) & \dots & a_{N_{\delta}N_{\delta}}''(\mathbf{v}_n) \end{bmatrix}.$$

Показано, що блоки  $\mathbf{S}_{R_{R-T}}(\mathbf{v}_n) = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{v}_n)$  та  $\mathbf{S}_{R_T-R}(\mathbf{v}_n) = \mathbf{S}_{R_{R-T}}^T(\mathbf{v}_n) = (\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{v}_n))^T$  визначаються через ортогоналізуючу матрицю падаючих хвиль, яка була знайдена у даному підрозділі. Блок  $\mathbf{S}_{R_R}(\mathbf{v}_n)$  визначається наступним чином

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{R_R}(\mathbf{v}_n) = & -\mathbf{S}_{R_{R-T}}(\mathbf{v}_n)(2\tilde{\mathbf{Z}}_{\Sigma}(\mathbf{v}_n) - \mathbf{z}(\mathbf{v}_n) + \mathbf{E})^{-1}(2\tilde{\mathbf{Z}}_{\Sigma}(\mathbf{v}_n) - \mathbf{z}(\mathbf{v}_n) - \mathbf{E}) \times \\ & \times (\mathbf{E} - \mathbf{S}_{R_T}(\mathbf{v}_n)(2\tilde{\mathbf{Z}}_{\Sigma}(\mathbf{v}_n) - \mathbf{z}(\mathbf{v}_n) + \mathbf{E})^{-1}(2\tilde{\mathbf{Z}}_{\Sigma}(\mathbf{v}_n) - \mathbf{z}(\mathbf{v}_n) - \mathbf{E}))^{-1} \mathbf{S}_{R_T-R}(\mathbf{v}_n), \end{aligned}$$

де  $\mathbf{z}(\mathbf{v}_n)$  – нормована матриця власних і взаємних опорів випромінювача;

$$\tilde{\mathbf{Z}}_{\Sigma}(\mathbf{v}_n) = (\mathbf{E} - \mathbf{S}_{R_T}^*(\mathbf{v}_n))^{-1T} \mathbf{A}^{*-1T}(\mathbf{v}_n) \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{v}_n) (\mathbf{E} - \mathbf{S}_{R_T}(\mathbf{v}_n))^{-1}.$$

Отримані співвідношення дозволяють розрахувати всі блоки матриці розсіювання, які необхідні при складанні і розв'язанні рівнянь стану системи БПЕ і визначені її зовнішніх характеристик.

В четвертому розділі “Розв’язок рівнянь стану. Зовнішні параметри системи БПЕ” викладено 4 та 5 етапи побудови математичної моделі системи БПЕ.

У підрозд. 4.1 вирішено питання, пов’язане з виконанням найбільш трудомісткого етапу аналізу систем БПЕ – етапу числового визначення змінних стану. Зазначається, що процес рішення рівнянь виду (2) полягає у приведенні їх до більш простої системи нелінійних рівнянь з подальшим вирішенням отриманої системи різного роду ітераційними методами (наприклад, методом Ньютона, або методами, заснованими на мінімізації функцій багатьох змінних). Дані методи відносяться до групи методів гармонійного балансу, або його модифікацій. В даний час ці методи є основою алгоритмів аналізу нелінійного режиму, які реалізовані в сучасних пакетах САПР НВЧ (AWRDE, ANSYS Electronics Desktop, ADS, APlac) і успішно використовуються при моделюванні і проектуванні різноманітних нелінійних пристроїв НВЧ. Розробники даних пакетів значну увагу приділяють збільшенню швидкодії ітераційного процесу. Однак, орієнтування на розробку

пакетів, призначених для аналізу нелінійних схем загального вигляду, не припускало врахування специфічних властивостей лінійних підсхем конкретного класу пристроїв. Тому, як показує практика, алгоритми, засновані на даних методах, дозволяють успішно аналізувати схеми, що містять близько десятка нелінійних елементів, з утриманням при цьому  $5 \div 7$  спектральних складових струмів або напруг. Безпосереднє застосування згаданих вище методів для аналізу систем БПЕ, які, як правило, містять значну кількість НЕ, недоцільно, а в низці випадків і неможливо через великий обсяг необхідної оперативної пам'яті ЕОМ і неприйняттого зростання часу обчислень.

Для усунення цього недоліку в даному підрозділі розвинуто ефективний дворівневий ітераційний метод, заснований на ідеї декомпозиції, суть якої полягає в об'єднанні НЕ у групи за ознакою їх зв'язку між собою і через лінійну підсхему (багатополіусник ЛБ). Об'єднання провадиться таким чином, щоб усередині окремих груп містилися так звані "сильнозв'язані" елементи, тобто такі елементи, для яких зміна режиму одного з них справляє істотний вплив на режим інших НЕ даної групи, незначно позначаючись при цьому на режимі нелінійних елементів з інших груп. Це дозволяє організувати дворівневий ітераційний процес розв'язання системи рівнянь стану таким чином, що у процесі ітерацій нижнього рівня незалежно визначаються змінні стану, які описують окрему групу НЕ, а взаємозв'язок цих груп через ЛБ враховується на верхньому рівні ітерацій. Запропонований спосіб дозволяє замінити розв'язання задачі великої розмірності розв'язанням послідовності задач меншої розмірності. Фактично використання ідеї декомпозиції дає змогу при однаковій точності отримуваних результатів аналізувати схеми, що містять НЕ як мінімум у два-три рази більше, ніж це було можливо у разі застосування однорівневих ітераційних методів. Це дає змогу на ЕОМ середньої продуктивності аналізувати антени, що містять порядку декількох десятків нелінійних елементів, враховуючи при цьому до десяти-двадцяти спектральних складових на кожному НЕ.

Для реалізації дворівневого методу рівняння стану (2) було перетворене до вигляду

$$\mathbf{f}^T(t)\mathbf{x}_l + \tilde{\mathbf{Q}}_{Nl} \left\{ \mathbf{f}^T(t)\{\mathbf{Q}\}_{ll} \mathbf{x}_l + \sum_{\substack{l_1=1 \\ l_1 \neq l}}^M \mathbf{f}^T(t)\{\mathbf{Q}\}_{ll_1} \mathbf{x}_{l_1} + \boldsymbol{\psi}_l(t) \right\} = 0, \quad \forall l = \overline{1, M} \\ \text{при } 0 \leq t \leq T, \quad (10)$$

де  $\mathbf{f}(t) = \frac{1}{2} \{ e^{j\nu_{-N}t}, \dots, e^{j\nu_{-1}t}, 2, e^{j\nu_1t}, \dots, e^{j\nu_Nt} \}^T$ ,  $\tilde{\mathbf{Q}}_{Nl}$  – нелінійний оператор, що описує зв'язок між впливом і відгуком на клемі  $l$ -го нелінійного елемента,  $M$  – загальна кількість груп сильнозв'язаних елементів.

У рівнянні (10) в явному вигляді виділено доданок (другий у фігурних дужках), який характеризує вплив груп НЕ одна на одну. Запропоновано його використати у вигляді поправки до  $\boldsymbol{\psi}_l(t)$ , що дало змогу розв'язок матричної системи (10), яка має

розмірність  $\sum_{l=1}^M r_l$  ( $r_l$  – розмірність вектора змінних стану, що описує  $l$ -у групу НЕ), представити як дворівневий ітераційний процес розв'язання незалежних матричних

рівнянь, кожне з яких має розмірність  $r_l$ , тобто значно меншу ніж розмірність вихідної системи. На одному кроці ітерацій верхнього рівня розв'язується  $l$  незалежних рівнянь вигляду

$$\mathbf{f}^T(t)\mathbf{x}_l^{(k+1)} + \tilde{\mathbf{Q}}_l \left\{ \mathbf{f}^T(t) \{ \mathbf{Q} \}_{ll} \mathbf{x}_l^{(k+1)} + \Psi_l^{(k+1)}(t) \right\} = 0 \quad \forall l = \overline{1, M}, \quad (11)$$

де  $\Psi_l^{(k+1)}(t) = \psi_l(t) + \Delta \psi_l^{(k+1)}(t)$ ,  $\Delta \psi_l^{(k+1)}(t) = \sum_{\substack{l_1=1 \\ l_1 \neq l}}^M \mathbf{f}^T(t) \{ \mathbf{Q} \}_{ll_1} \mathbf{x}_{l_1}^{(k)}$ .

Далі визначається поправка до  $\Psi_l^{(k+1)}(t)$ , яка потім уточнюється в ході наступних ітерацій. Розв'язання кожного з рівнянь (11) будь-яким з ітераційних методів являє собою ітераційний процес нижнього рівня.

У *підрозд. 4.2* досліджено особливості верхнього рівня ітерацій. Доведено його збіжність до точного розв'язання (11), отримано умови збіжності. На конкретних прикладах (аналізу ректен) досліджено швидкість збіжності в залежності від параметрів лінійних та нелінійних елементів, що входять до схеми ректени. Результати, здобуті при аналізі збіжності ітераційного процесу верхнього рівня, дозволили запропонувати його модифікацію. Вона полягає в тому, що в ітераційні співвідношення вводиться деяка додаткова змінна, яка впливає як на область збіжності, так і на швидкість її. Показано, що належним вибором цієї змінної ітераційний процес верхнього рівня можна зробити абсолютно збіжним при будь-яких параметрах елементів ректени, що дозволяє в ході числових розрахунків уникнути багатьох неприємностей, пов'язаних з вибором початкової точки ітерацій.

Через складність систем БПЕ розв'язання рівнянь стану потребує значних обчислювальних витрат, тому у *підрозд. 4.3* розглянуто питання підвищення швидкодії ітерацій верхнього рівня. Запропоновано способи, які реалізуються на алгоритмічному рівні та такі, що враховують конкретні особливості схеми АНЕ.

В *підрозд. 4.4* отримані вирази для розрахунку зовнішніх параметрів системи БПЕ, що описують міжсистемну взаємодію та внутрішньосистемні процеси.

В *підрозд. 4.5* з метою контролю одержаних результатів у теоретичних дослідженнях було проведено порівняльний аналіз розрахункових результатів з відомими з літератури окремими чисельними та експериментальними даними, який показав адекватність розробленої математичної моделі системи БПЕ.

Таким чином, у 2–4 розділах дисертації повністю сформовано нелінійну математичну модель електродинамічного рівня, яка дозволяє провести всебічне дослідження систем БПЕ в яких використовуються різні технології передачі енергії.

У розділах 5–7 використовуючи розроблену математичну модель вирішувались окремі задачі, пов'язані з удосконаленням теорії та практики побудови передавальних та приймальних підсистем системи БПЕ сфокусованим мікрохвильовим променем.

У **п'ятому розділі** “Передавальна підсистема системи БПЕ мікрохвильовим променем” розглянуті задачі, пов'язані з питаннями аналізу та проектування передавальних підсистем систем БПЕ мікрохвильовим променем.

В *підрозд. 5.1* вирішена задача визначення ЕМП передавальних підсистем у зоні Френеля з урахуванням виникаючих в них нелінійних ефектів. Дана задача на

етапах проектування потужних систем БПЕ мікрохвильовим променем являє собою окремий науковий інтерес тому що виникаючі шкідливі нелінійні ефекти в передавальних підсистемах суттєво впливають, як на електромагнітну сумісність, так і на якість функціонування самої системи БПЕ. Декомпозиція системи БПЕ на підсистеми (передавальну й приймальну) проводилася в припущенні, що ректена розташовується в зоні Френеля на такій відстані відносно передавальної антени, при якій можна знехтувати їхнім взаємним впливом (міжсистемні взаємодії не враховувалися). Вважалось, що невідомі функції розподілу густини поверхневого електричного струму  $\vec{J}^e(\vec{r}'_i, \nu_n)$  на поверхні  $i$ -х випромінювачів знайдені з розв'язку НІР (8), а функції розподілу густини поверхневого магнітного струму  $\vec{J}^m(\vec{r}'_i, \nu_n)$  визначено із нелінійних граничних умов. Далі отримані співвідношення для розрахунку ЕМП, які створюються системою випромінювачів з нелінійними характеристиками у зоні Френеля:

$$\vec{E}(r, \theta, \varphi, \nu_n) = \frac{\nu_n \mu_a}{4\pi j} \sum_{i=1}^N \frac{e^{-jk_n r_i}}{r_i} \left( \left[ \vec{e}_{r_i} \left[ \vec{f}_i^e(\theta, \varphi, \nu_n) \vec{e}_{r_i} \right] \right] + \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} \left[ \vec{f}_i^m(\theta, \varphi, \nu_n) \vec{e}_{r_i} \right] \right), \quad (12)$$

$$\vec{H}(r, \theta, \varphi, \nu_n) = \frac{\nu_n \epsilon_a}{4\pi j} \sum_{i=1}^N \frac{e^{-jk_n r_i}}{r_i} \left( \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a}} \left[ \vec{e}_{r_i} \vec{f}_i^e(\theta, \varphi, \nu_n) \right] + \left[ \vec{e}_{r_i} \left[ \vec{f}_i^m(\theta, \varphi, \nu_n) \vec{e}_{r_i} \right] \right] \right), \quad (13)$$

де  $\vec{f}_i^{e,m}(\theta, \varphi, \nu_n) = \iint_{S_i} \vec{J}^{e,m}(\vec{r}'_i, \nu_n) e^{jk_n(x'_i \cos \alpha_i \sin \theta \cos \varphi + y'_i \cos \beta_i \sin \theta \sin \varphi + z'_i \cos \delta_i \cos \theta)} dS_{iq}$  – векторні функції залежні тільки від кутових координат точки спостереження  $(\theta, \varphi)$  обумовлені заданими розподілами струмів  $\vec{J}^{e,m}(\vec{r}'_i, \nu_n)$ , що характеризують залежність створюваного ними поля в дальній зоні від кутових координат на частотах  $\nu_n$ ,

$\cos \alpha_i, \cos \beta_i, \cos \delta_i$  – напрямні косинуси,  $\vec{e}_{r_i}$  – одиничний орт у напрямку  $r_i$ .

З отриманих у підрозділі результатів витікає, що наявність нелінійності у випромінювачах призводить до утворення на їхніх поверхнях густини електричного струму на комбінаційних частотах  $\nu_n$ , це у свою чергу призводить до розфокусування електромагнітного випромінювання на основній частоті й значному розширенню зони Френеля поля побічного випромінювання. Дальня границя зони Френеля на частоті  $n$ -ї гармоніки визначається співвідношенням  $r_n = 2L^2 n / \lambda_0$ , тобто  $n$ -й частотній гармоніці відповідає своя довжина зони Френеля, яка росте зі збільшенням номера гармоніки й приблизно в  $n$  разів перевищує дальність передачі енергії. Таким чином, випромінювальні структури з нелінійними характеристиками на частотах гармонік можуть створювати в певних напрямках поля значної інтенсивності й суттєво погіршувати функціонування інших РЕС, що перебувають навіть на значних відстанях від ректени.

У підрозд. 5.2 запропоновано варіант технічної реалізації систем БПЕ мікрохвильовим променем до важкодоступних об'єктів на основі багатопозиційних систем випромінювачів (БСВ). Системи БПЕ побудовані на основі БСВ (рис. 3) поєднують у єдину когерентну систему  $N$  передавальних модулів (ПМ) з

рознесеними в просторі їх випромінювальними структурами та загальним центром керування (ЦК). ПМ системи БПЕ об'єднані в єдину мережу, за допомогою якої виконується обмін інформацією (формування необхідного розподілу поля на апертурі ректени, наведення мікрохвильового променя на аперттуру ректени по пілот-сигналу, формованого приймально-передавальним модулем (ППМ), фокусування та розфокусування ЕМВ у випадку позаштатних ситуацій, контроль точності установки амплітуди і фази на передавальних випромінювальних системах і т.д.) між ведучим передавальним модулем і підлеглими передавальними модулями.

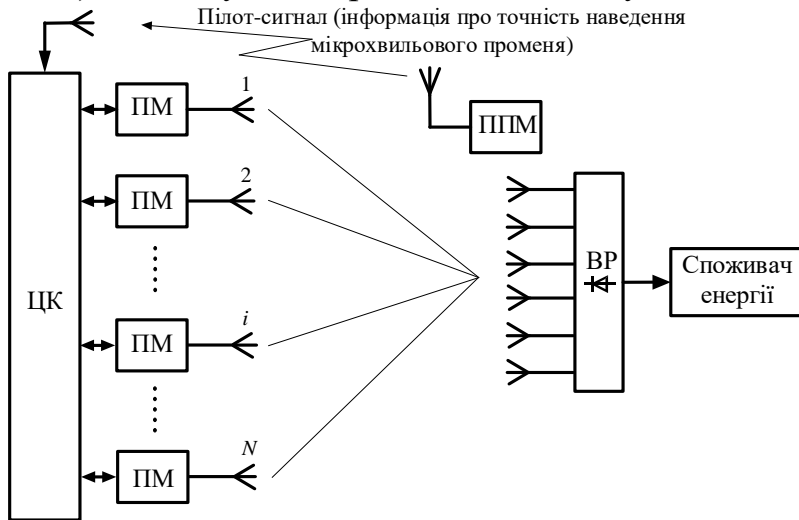


Рис.3. Структурна схема системи БПЕ з передавальною БСВ

геометрією розташування випромінювачів показаної на рис. 4. На рис. 5, наведені результати математичного моделювання поля в площині розташування ректени на

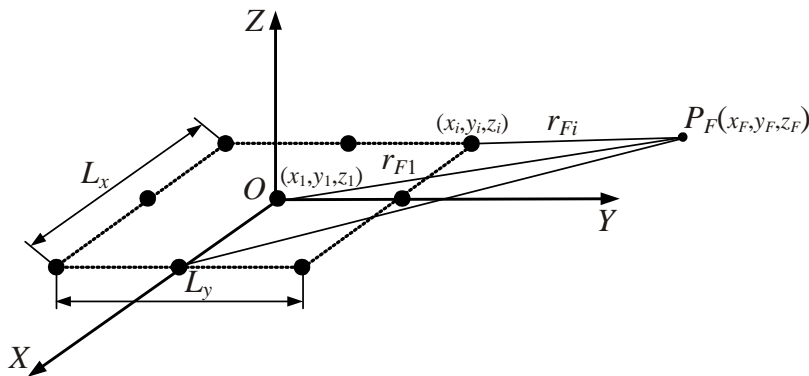


Рис. 4. Розташування випромінювачів у БСВ

графіку наведені розподіли нормованої густини потоку потужності на апертурі ректени радіусом  $\rho=1,3$  м при фокусуванні на відстань  $z_F = 15$  км ( $L_x = L_y = 517$  м) (суцільна лінія) і на  $z_F = 29$  км ( $L_x = L_y = 1000$  м) (кружечки). Видно, що в системах БПЕ із БСВ однаково ширину фокальної плями (однаковий режим збудження ректени) на різних відстанях фокусування можна забезпечити варіюючи геометричним розміром системи випромінювачів ( $L_x \times L_y$ ).

Залежно від необхідних у даний момент часу просторових і енергетичних характеристик ЕМВ на ВРР для кожної випромінювальної позиції задаються певні координати й встановлюються на них необхідні амплітудно-фазові розподіли (АФР).

У підрозділі було проведено математичне моделювання поля на апертурі ВРР створеного сфокусованою БСВ із квадратною апертурою і частоті  $f_0 = 10$  ГГц для різних відстаней фокусування. При моделюванні передбачалося, що випромінювачами БСВ є рупорної ФАР модульного типу. ФАР складається з 4 модулів, кожний з яких являє собою квадратні решітки з розмірами  $85 \times 85$  см<sup>2</sup> і числом випромінювачів 144.

На рис. 5 на одному графіку наведені розподіли нормованої густини потоку потужності на апертурі ректени радіусом  $\rho=1,3$  м при фокусуванні на відстань  $z_F = 15$  км ( $L_x = L_y = 517$  м) (суцільна лінія) і на  $z_F = 29$  км ( $L_x = L_y = 1000$  м) (кружечки). Видно, що в системах БПЕ із БСВ однаково ширину фокальної плями (однаковий режим збудження ректени) на різних відстанях фокусування можна забезпечити варіюючи геометричним розміром системи випромінювачів ( $L_x \times L_y$ ).

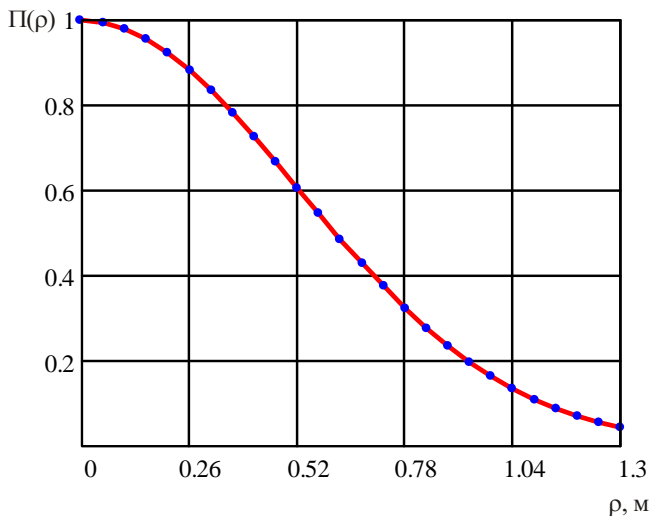


Рис. 5. Розподіл нормованої густини потоку потужності на апертурі ректени

легко створювати мобільні системи БПЕ, що швидко розгортаються, наприклад, для енергопостачання об'єктів у зонах стихійних лих, тому що варіюванням конфігурації БСВ (геометрія, число випромінювачів) можна забезпечувати той самий режим збудження ректени (однаковий амплітудний розподіл поля і його інтенсивність), тобто при фіксованих розмірах ректени одержувати однакові її характеристики на різних відстанях фокусування.

В підрозділі зазначено, що застосування БСВ дозволяє значно розширити функціональні можливості систем БПЕ, одержати їх характеристики, які не можливо забезпечити в системах БПЕ з однопозиційними передавальними антенами. Однак, при технічній реалізації систем БПЕ із БСВ необхідно буде вирішувати й ряд додаткових нових задач. Серед них задача аналізу та проектування ефективних ВРР систем БПЕ з БСВ при їх суттєво нерівномірному збудженні. Вирішенню цих задач присвячені наступні розділи дисертації.

У розділі 6 “Великоапертурні ректени при рівномірному збудженні (Модель нескінченних решіток)” використовуючи узагальнену нелінійну математичну модель електродинамічного рівня системи БПЕ була вирішена задача теоретичного обґрунтування можливості й умов застосування наближення моделі нескінченних решіток для аналізу великоапертурних ректен.

У підрозд. 6.1 сформульована постановка задачі досліджень. Розглядалася плоска ректенна решітка розташована в нескінченному, однорідному та ізотропному просторі, що складається з ідентичних ПВЕ які в загальному випадку можуть мати випромінювачі з довільною конфігурацією. ПВЕ однаковим образом розташовані у вузлах косокутної сітки з подвійною періодичністю уздовж осей  $x$  і  $l$  (рис.6). Період уздовж осі  $x$  рівний  $dx$ , період уздовж осі  $l$  рівний  $dl$ . Вісь  $l$  утворює з віссю  $x$  кут  $\alpha_r$ . Чарунка з індексом  $(0,0)$  була названа центральною. Положення кожного ПВЕ визначено індексами  $(p,q)$ . Ректенна решітка збуджується на частоті  $\omega_0$  плоскою електромагнітною хвилею, що приходить із напрямку  $\theta, \varphi$  (рис. 6).

У підрозділі зазначено, що усю процедуру аналізу ВРР можна розділити на наступні етапи:

На підставі отриманих результатів моделювання передавальних БСВ було виділено ряд переваг систем БПЕ побудованих на основі БСВ в порівнянні із системами БПЕ побудованих на основі однопозиційних передавальних антен:

- у системах БПЕ із БСВ можливо при відносно невеликих потужностях випромінювання окремих передавальних позицій, одержувати необхідне високе значення густини потоку потужності в точці фокусування за рахунок збільшення числа позицій  $N$ ;

- на основі БСВ можна порівняно

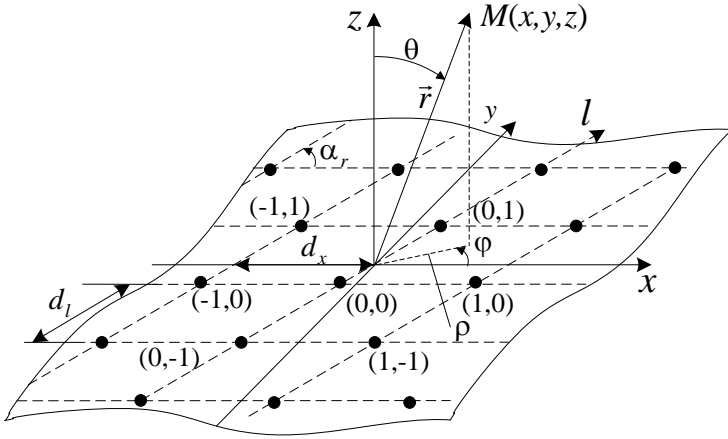


Рис.6. Геометрія періодичної випромінювальної структури ректенної решітки

На першому з перерахованих вище етапів повинна розглядатися нескінченна ( $N_x, N_l \rightarrow \infty$ , рис. 6) решітка ПВЕ й, виходить, що багатополосники ЛБ-4, ЛБ-6 (рис. 2) мають нескінченне число входів.

На другому етапі – етапі визначення зовнішніх параметрів, ректена розглядається як решітка з кінцевим числом ПВЕ ( $N_x \times N_l$ ). Отже, багатополосники ЛБ-4 і ЛБ-6 описуються матрицями кінцевої розмірності.

Підрозд. 6.2 присвячений аналізу нелінійного режиму ВРР. У підрозділі зазначено, що на першому етапі аналізу (при визначенні режиму функціонування ректени) досить описувати ЛБ тільки з боку входів, які підключені до нелінійного багатополосника (перетин  $\alpha - \alpha$ ). Це означає, що для лінійного багатополосника досить знати його матрицю власних і взаємних опорів  $\mathbf{Z}_{\alpha\alpha}(\omega)$  та вектор комплексних амплітуд ЕРС  $\mathbf{e}_{\alpha\alpha}(\omega)$ , перерахованих до перетину  $\alpha - \alpha$ . При виводі рівнянь стану ВРР покладено, що НБ ПВЕ містять  $m = N_\alpha$  входів і описуються характеристикою виду  $\mathbf{i}_n(t) = \tilde{\mathbf{R}}_N \{ \mathbf{u}_n(t) \}$ .

Доведено, що при періодичному або майже періодичному режимі збудження ВРР рівняння стану досить розв'язати тільки для однієї чарунки, наприклад для  $p=q=0$  (центральної рис. 6):

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta_n \mathbf{I}_n^{(0,0)} \exp\{jn\omega_0 t\} + \tilde{\mathbf{R}}_N \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta_n \tilde{\mathbf{Z}}(n\omega_0) \mathbf{I}_n^{(0,0)} \exp\{jn\omega_0 t\} + \mathbf{e}^{(0,0)}(t) \right\} = 0, \forall t \in [0, T], \quad (14)$$

де  $\mathbf{I}_n^{(0,0)}$  – вектор розмірності  $m$ , елементами якого є комплексні амплітуди струмів  $n$ -ї гармоніки для груп входів ЛПС із номерами  $(0,0)$  (перетину  $\alpha - \alpha$ ),

$\tilde{\mathbf{Z}}(n\omega_0) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \mathbf{Z}_{k,l}(n\omega_0) \exp\{jn[ak + bl]\}$ ,  $\mathbf{Z}_{k,l}(n\omega_0)$  – блок матриці  $\mathbf{Z}_{\alpha\alpha}(\omega)$ , що

описує взаємодію між групами входів, з якими з'єднуються нелінійні багатополосники ПВЕ та відносяться до чарунок із номерами  $(0,0)$  і  $(k,l)$ ,  $\mathbf{e}^{(0,0)}(t)$  – вектор ЕРС, що наводиться полем падаючої хвилі на клемах випромінювальної структури й перелічений до перетинів  $\alpha - \alpha$  ПВЕ, який розташований в чарунці з номером  $(0,0)$ .

- етап розрахунків режиму роботи ВРР;

- етап визначення її зовнішніх параметрів.

Етапи аналізу для ВРР мають свої особливості, які полягають у наступному.

Згідно з наближенням нескінченних решіток, передбачається, що режим роботи кожного із ПВЕ такий, яким він був би, якби даний елемент перебував у складі нескінченної решітки. Отже, на



Таким чином, аналіз ВРР при періодичному або майже періодичному режимі її

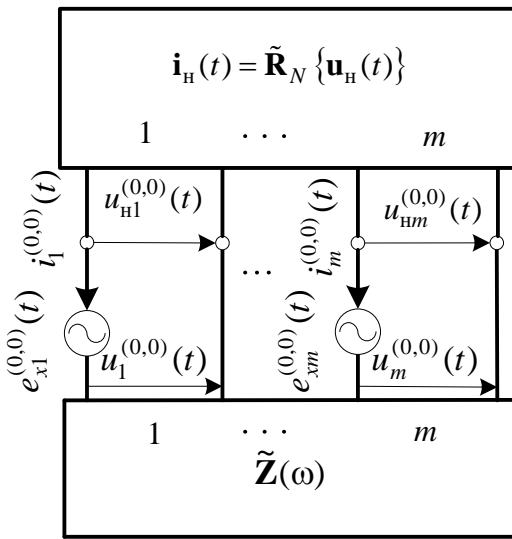


Рис.7. «Еквівалентний» ПВЕ в складі нескінченної решітки

збудження зводиться до аналізу кола, наведеного на рис. 7. Це коло складається з одного нелінійного  $2m$ -полюсника і одного лінійного багатополюсника, матриця опорів якого визначена на частотах усіх гармонік і рівна  $\tilde{\mathbf{Z}}(n\omega_0) \forall n \in (-\infty, \infty)$ . У ході аналізу такого кола необхідно розв'язати систему рівнянь  $m(2N+1)$ -го порядку ( $N$  – число утримуваних у ході розрахунків гармонік струмів). Отже, розв'язок рівнянь стану ВРР в наближенні нескінченних решіток зводиться до розв'язку системи для одного «еквівалентного» ПВЕ в складі нескінченної решітки. Отриманий результат подібний відомої з теорії лінійних антенних решіток концепції «одиночної» чарунки.

У підрозд. 6.3 використовуючи отримані у розд. 2 вихідні рівняння системи БПЕ записані вирази для визначення зовнішніх параметрів ВРР (потужність постійного струму у навантаженні ректени, ККД ректени, поле розсіяне ректеною на основній частоті та частотах гармонік).

Отримані результати досліджень в попередніх підрозділах дозволили розробити ефективну методику розрахунків ВРР при рівноамплітудному їх збудженні з використанням наявних алгоритмів і програм розрахунків одиночних ПВЕ. Розроблена методика була використана у підрозд. 6.4 для аналізу потенційних характеристик ПВЕ – першого етапу проектування ректен. На цьому етапі для заданої конфігурації ПВЕ оцінюються його максимально можливі енергетичні характеристики в залежності від параметрів випрямних діодів. У даному підрозділі досліджено вплив параметрів ВАХ випрямного діода  $i = I_s (e^{\frac{q}{kTm}u} - 1)$  ( $i$  – струм через діод;  $u$  – напруга на переході діода;  $I_s$  – струм насичення;  $q$  – заряд електрона;  $k$  – постійна Больцмана;  $T$  – температура переходу;  $m$  – коефіцієнт неідеальності характеристики діода) на величину ККД однопівперіодного ПВЕ.

Наведені на рис. 8 результати моделювання служать орієнтиром при виборі випрямних діодів. Для забезпечення максимально можливого ККД випрямлення бажано використовувати діоди з коефіцієнтом  $m$  близьким до 1 і як можна більшим струмом насичення  $I_s$ . Також у підрозділі показано, що при проектуванні ректен застосовуваних у різних системах БПЕ необхідно враховувати й температурний режим їх експлуатації.

У розділі 7 “Аналіз великоапертурних ректен при нерівномірному їх збудженні” розроблена методика аналізу ВРР, які збуджуються електромагнітним полем з нерівномірним амплітудним розподілом.

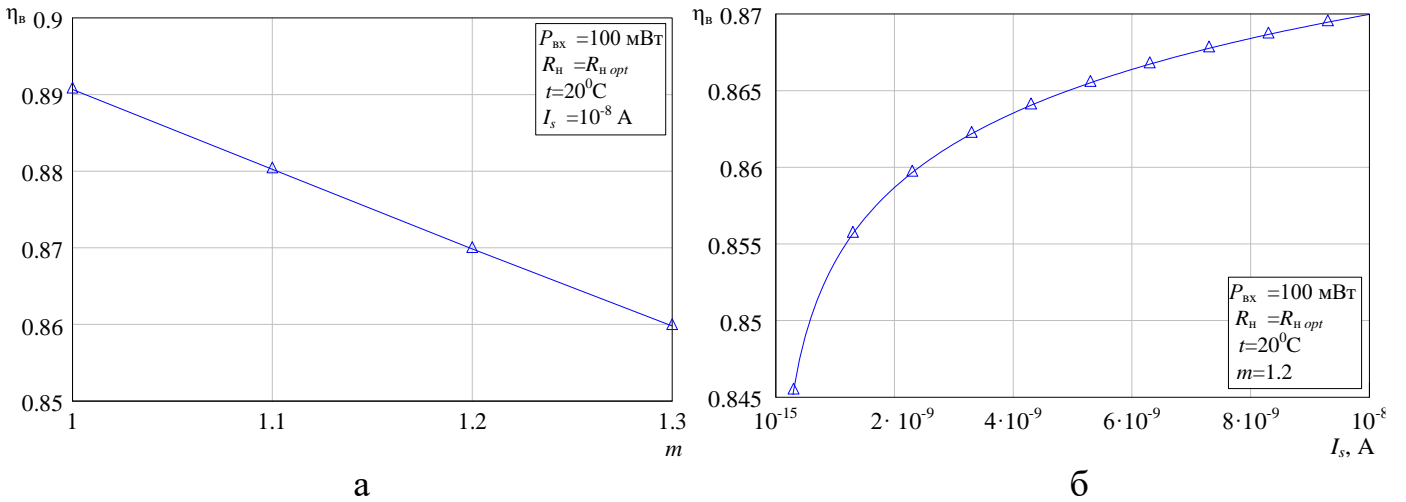


Рис. 8. Залежності ККД ПВЕ ректени від  $m$  (а),  $I_{\text{с}}$  (б)

У підрозд. 7.1 запропоновано підхід аналізу ВРР при їх нерівномірному збудженні. Розглядалася ВРР збуджувана полем (рис. 5) створюваним БСВ (рис. 4). Аналіз такої ВРР являє собою складну задачу. Складність аналізу при такому збудженні полягає в тому, що через його нерівномірність ВРР не може бути описана моделлю у вигляді нескінченних періодичних решіток, у рамках якої її аналіз зводиться до аналізу одиночного центрального ПВЕ, що рівномірно опромінюється. Створення ефективної методики аналізу ВРР у цьому випадку можливо лише при введенні припущення. Суть цього припущення полягає в тому, що амплітудний розподіл у розкритті ВРР є повільно мінлива функція координат. При регулярному розташуванні ПВЕ це дозволяє представити апертуру ректени у вигляді ряду кільцевих зон, у яких розміщені рівноамплітудно збуджувані ПВЕ з однаковими параметрами (рис. 9), тобто апроксимувати амплітудний розподіл (рис. 5) східчастою функцією (рис. 10).

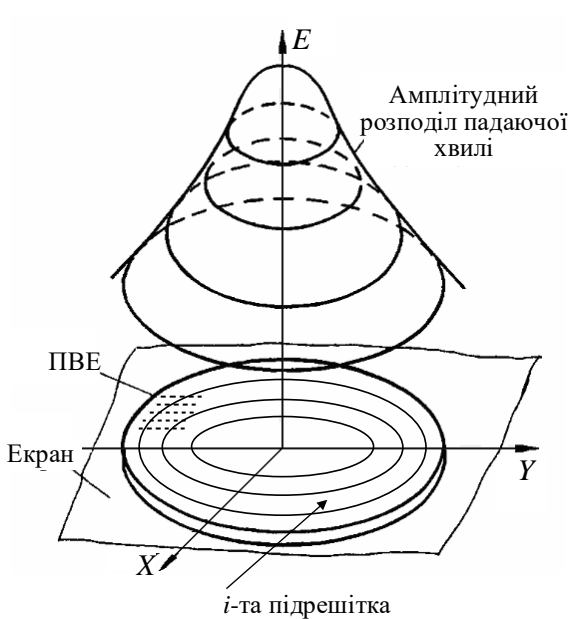


Рис. 9. Представлення апертури ректени у вигляді набору концентричних зон

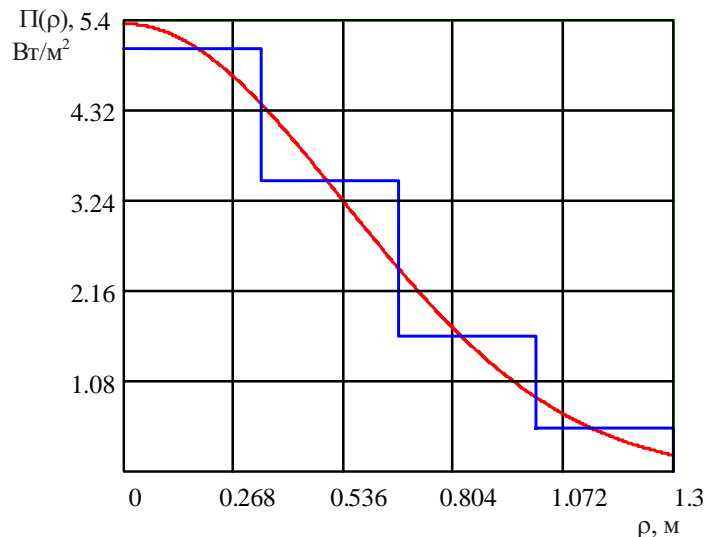
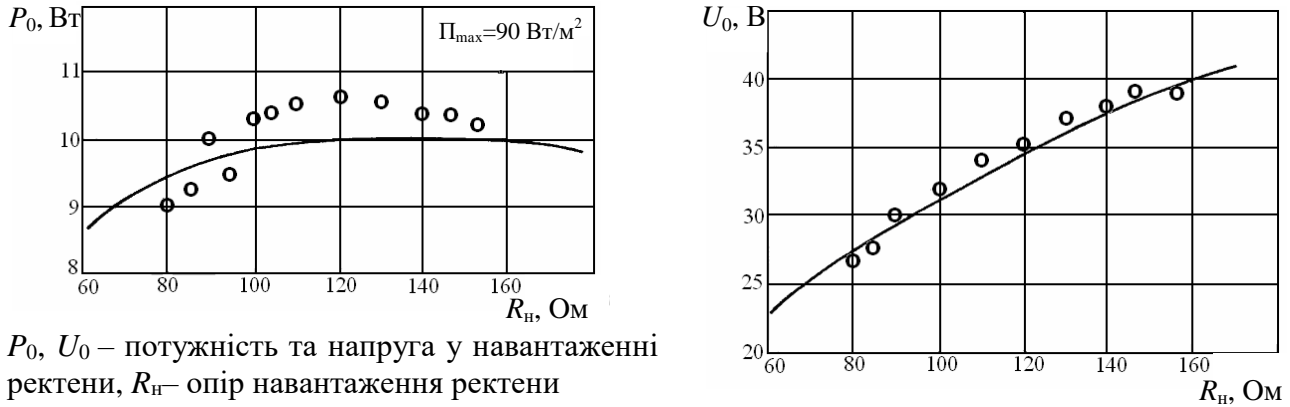


Рис. 10. Розподіл густини потоку потужності на ректені і його апроксимація

У підсумку це дозволяє розглядати апертуру ректени як сукупність невзаємодіючих періодичних підрешіток ПВЕ, а кожну таку підрешітку, при визначенні режиму її роботи, аналізувати як фрагмент нескінченної періодичної антени з нелінійними елементами. Можливість практичного застосування розробленої методики аналізу великоапертурних ректен при нерівномірному їх збудженні підтверджена шляхом порівняння результатів розрахунків (суцільні криві) по ній з відомими експериментальними даними (кружки) (рис. 11).



$P_0$ ,  $U_0$  – потужність та напруга у навантаженні ректени,  $R_n$  – опір навантаження ректени

Рис. 11. Результати порівняння параметрів ректени отриманих теоретичним і експериментальним шляхами

На підставі отриманих результатів, наведених на рис. 11, можна вважати, що запропонована методика аналізу ректен при нерівномірному її опроміненні цілком може бути застосовна на практиці.

У підрозд. 7.2 поетапно викладений алгоритм розрахунку та практичні рекомендації щодо проектування ВРР на прикладі її комп'ютерного моделювання як прикінцевого пристрою системи БПЕ з передавальною БСВ (рис. 4). Було проведено моделювання ВРР, яка перетворює ЕМП з круговою поляризацією у постійний струм. Випромінювальна структура ректени складалася із системи паралельних мікросмушкових провідників (рис. 12) у розриви яких через рівні проміжки включені випрямні діоди Шоттки. У нижньому шарі ВРР розміщені ПВЕ перетворюючі ЕМП з вертикальною поляризацією, а у верхньому – з горизонтальною. Така конструкція ректени дозволяє зменшити її розміри або збільшити питому потужність постійного струму, що знімається з одиниці площі апертури.

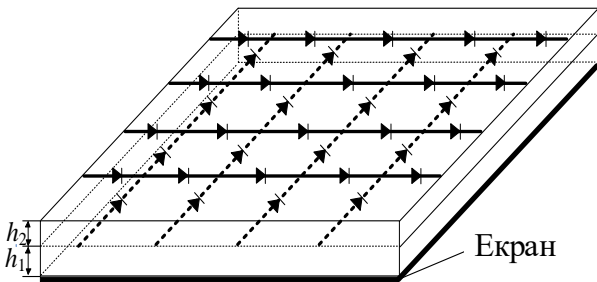


Рис.12. Ректена, що працює на ортогональних поляризаціях

Перший етап пов'язаний з розрахунком ПВЕ в складі нескінченної ВРР, що містить в собі вибір випрямних діодів по критерію максимального ККД випрямлення ПВЕ, який визначався наступним чином

$$\eta_B = P_0 / P_{\text{вх}},$$

де  $P_0$  – потужність постійного струму в навантаженні ПВЕ;  $P_{\text{вх}} = P_{\text{макс}} = e_a^2 / 8R_a(f_0)$  – максимальна потужність, яку може витягти випромінювач ПВЕ з поля падаючої ЕМХ;  $e_a$  – амплітуда напруги холостого ходу, що наводиться падаючою хвилею на

клемах випромінювача;  $R_a(f_0)$  – активна частина вхідного опору випромінювача на робочій частоті  $f_0$ .

Наведені на рис. 13. результати моделювання ККД випрямлення на частоті 10 ГГц від вхідного опору ПВЕ для різних випрямних діодів показують, що параметри випрямних діодів суттєво впливають на величину  $\eta_v$ . Тому етап оцінки потенційних характеристик ПВЕ заданої конфігурації має бути обов'язковим. Отже в подальшому моделюванні ВРР використовувався випрямний діод Шоттки 3A149A-3. З рис. 13 видно при яких вхідних опорах ПВЕ досягається максимальний ККД випрямлення.

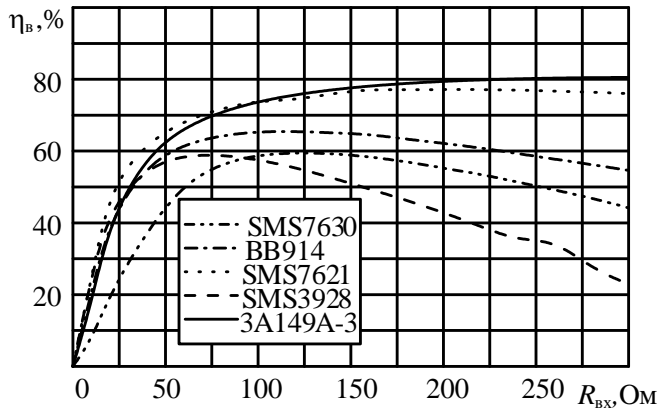


Рис. 13. Залежність ККД випрямлення ПВЕ від  $R_{вх}$

Ці данні були вхідними на другому етапі – електродинамічному моделюванні випромінювальної структури ПВЕ (рис. 12).

Третій етап пов'язаний з розрахунками ПВЕ по постійному струму в кожній зоні ректени (табл. 1). Моделлю ПВЕ по постійному струму є або еквівалентний генератор напруги холостого ходу  $E_i$  із внутрішнім опором  $R_i$ , або еквівалентний генератор струму короткого замикання  $I_i$  із внутрішньою провідністю  $G_i$ , параметри яких залежать від рівня

густини потоку потужності падаючого поля  $\Pi$  та опору навантаження  $R_H$  по постійному струму:

$$E_i = f(\Pi, R_H), R_i = f(\Pi, R_H).$$

Табл.1. Результати розрахунків ректени

Номер зони	$\Pi_i$ , Вт/м <sup>2</sup>	$\eta_{vi}$ , %	$P_{vxi}$ , мВт	$E_i$ , В	$R_i$ , Ом
1	4,98	65,74	2,32	3,09	1179,9
2	3,10	55,98	1,43	2,42	1045,8
3	1,16	44,54	0,54	1,49	1042,3
4	0,27	15,88	0,13	0,72	1053,8

теорії електричних кіл.

З табл. 1 видно, що в силу нерівномірності опромінення ректени (рис. 10) еквівалентні напруги  $E_i$  й внутрішні опори  $R_i$ , які залежать від густини потоку потужності  $\Pi_i$  падаючого променя, суттєво відрізняються. Із цієї причини однотипне послідовне або паралельне об'єднання неідентичних генераторів для роботи на одне неоптимальне для них навантаження призводить до втрати частини потужності. Питання розробки принципів побудови ректен із високим КПД збору при суттєво нері-

Така модель дозволяє при розрахунках кіл постійного струму ВРР представити досить складну схему ПВЕ еквівалентним генератором постійного струму. Застосовуючи цю модель, можна скласти еквівалентну схему кіл постійного струму ВРР і розрахувати схему збору потужності (СЗП) постійного струму з позицій

вномірному опроміненні їх апертур вирішувались в наступному етапі моделювання ректени.

Вихідними даними для аналізу параметрів ректени з урахуванням СЗП постійного струму є: структура СЗП, характеристики ПВЕ ректени по постійному струму (табл. 1), значення опору навантаження. У ході обчислень повинні бути знайдені: потужність, що віддається ректеною у навантаження, струм і напруга в навантаженні, ККД збору ректени. Показано, що на практиці ВРР зручно будувати по модульному принципу. У межах модулів ПВЕ ректени по постійному струму об'єднуються послідовно або паралельно (модулі першого рівня). Потім модулі першого рівня об'єднуються паралельно або послідовно у модулі другого рівня і т.д. На останньому  $k$ -му рівні модулі  $k-1$  рівня підключаються послідовно або паралельно до навантаження ректени. Даний спосіб побудови ВРР привабливий, насамперед, його технологічністю, а, отже, і більш низькою вартістю виготовлення ректен. Отже, в цьому випадку СЗП являє собою багаторівневу послідовно-паралельну схему. Структурною одиницею послідовно-паралельних схем є модулі, утворені однотипним (послідовним або паралельним) з'єднанням модулів попереднього рівня. Кожний з них може бути розглянутий як еквівалентний генератор напруги, характеристики якого визначаються параметрами еквівалентних генераторів модулів попереднього рівня.

Далі у підрозділі була створена методика аналізу ККД збору для випадку СЗП довільної топології, яка враховує блочно-модульну конструкцію ректени, що робить досить ефективним її застосування при оптимізації ВРР. Для зменшення втрат збору потужності постійного струму, запропонований принцип мінімізації перепадів еквівалентних ЕРС модулів за рахунок оптимізації топології СЗП та шлях його технічної реалізації.

За результатами моделювання ВРР було зроблено ряд практичних рекомендацій та напрямків подальших досліджень для поліпшення їхніх енергетичних та експлуатаційних характеристик.

а). Відсутність у складі ПВЕ, що моделювались, вхідних ФНЧ суттєво погіршує ККД випрямлення, через втрати потужності за рахунок її перевипромінювання на частотах гармонік. За результатами моделювання ПВЕ ці втрати становлять порядку 20 %. Таким чином, для збільшення ККД випрямлення потрібно усунути перевипромінювання на частотах гармонік, що виникають у процесі випрямлення. Це забезпечується включенням у структуру ПВЕ вхідних ФНЧ, або застосуванням випромінювачів ПВЕ, які мають активний вхідний опір на частотах гармонік, що прагне до нуля, або використанням частотно-селективних поверхонь.

б). Збільшити ККД випрямлення в крайніх зонах ректени (табл. 1) можна такими способами:

- за рахунок конструктивного синтезу передавальної БСВ (вибір геометрії розташування випромінювачів та реалізації необхідного на них АФР) забезпечити на апертурі ректени розподіл поля близький до рівномірного;

- за рахунок застосування випрямних схем, що дозволяють при малих вхідних потужностях підвищити ККД випрямлення, наприклад, використовувати варіанти випрямних схем, які застосовуються в технологіях перетворення малопотужних електромагнітних полів у постійний струм (випрямлячі з множенням напруги, випрямлячі на основі польових транзисторів).

в). Необхідно провести додаткові дослідження з пошуку конструктивних рішень побудови схем збору потужності постійного струму ВРР. Це пов'язано з тим, що при об'єднанні послідовно великої кількості ПВЕ як еквівалентних генераторів напруги холостого ходу суттєво погіршується надійність СЗП, тому що вихід з ладу одного ПВЕ призводить до виходу з ладу всього ланцюга послідовно з'єднаних еквівалентних генераторів.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову *проблему*, що пов'язана із створенням та розвитком строгих підходів і методів для розв'язку задач аналізу та оптимізації з єдиних позицій систем БПЕ в яких використовуються різні технології передачі енергії. Проблему вирішено шляхом розробки нової більш коректної математичної моделі, яка враховує нелінійні ефекти, що виникають у досліджуваних системах БПЕ через наявність у їхньому складі антен та трактів їх живлення з нелінійними характеристиками, а також шляхом розробки методики алгоритмів аналізу та проектування таких систем.

*Основні результати* дисертаційної роботи полягають в наступному.

1. На основі проведеного аналізу існуючих рішень в галузі безпровідної передачі енергії проведена класифікація систем БПЕ за різними ознаками. Показано що більшість розроблених до теперішнього часу математичних моделей систем БПЕ базується на припущенні про їх лінійність, а відомі нелінійні моделі мають обмежені можливості, щодо проведення строгого аналізу усієї сукупності нелінійних ефектів, що виникають в досліджуваних системах БПЕ. Тому вирішення проблеми побудови коректної математичної моделі систем БПЕ, у складі яких присутні антени з нелінійними властивостями є актуальним.

2. Розроблено нову узагальнену нелінійну математичну модель електродинамічного рівня, що придатна для аналізу систем БПЕ в яких використовуються різні технології передачі енергії. Відповідно до розробленої моделі вся система БПЕ, яка включає в себе передавальну підсистему, приймальну підсистему і систему різних розсіювачів розглядається як єдина багатовходова антенна система з нелінійними характеристиками. Наведено узагальнену структурну схему нелінійної системи БПЕ. В передавальній та приймальній підсистемах системи БПЕ виділено нелінійні підсхеми, лінійні підсхеми, випромінювальні структури, генератори та навантаження. У відповідність кожній підсхемі системи БПЕ поставлено відповідні лінійні та нелінійні багатополосники для яких складені компонентні рівняння.

3. Отримано систему рівнянь стану в часовій області системи БПЕ. Обґрунтовано вибір вектору вихідних параметрів системи БПЕ. Запропоновано структурувати компоненти вектору вихідних параметрів системи БПЕ таким чином, що одна з груп вихідних параметрів характеризує процеси передачі, приймання та перетворення електромагнітної енергії у постійний струм у самій системі (внутрішньосистемні процеси), а друга процеси електродинамічної взаємодії системи БПЕ з іншими РЕС (міжсистемна взаємодія). Таке компонування вектору вихідних параметрів дозволяє дослідити характеристики системи БПЕ з урахуванням всього різноманіття нелінійних ефектів, пов'язаних як із виникненням

електромагнітних випромінювань на побічних частотах, так і з нелінійною залежністю характеристик антен системи БПЕ від рівня вхідної дії. При цьому враховуються не тільки нелінійні ефекти, що виникають у досліджуваній системі, а й ті що утворюються за рахунок міжсистемної взаємодії.

4. Отримано систему нелінійних інтегральних рівнянь багатовходових випромінювальних структур (для сталого періодичного або майже-періодичного режиму), до складу яких входять лінійні та нелінійні елементи з зосередженими параметрами. На основі цих рівнянь отримані співвідношення для обчислення блоків матриці розсіяння випромінювальної структури системи БПЕ, що характеризують внутрішньосистемні процеси. Показано, що блоки матриці розсіяння, які описують міжсистемну взаємодію можна одержати через блок матриці розсіяння, що описує внутрішньосистемні процеси.

5. Розроблено дворівневий ітераційний алгоритм числового розв'язання системи рівнянь стану, який у порівнянні з традиційними, розширює можливість аналізу нелінійних підсхем систем БПЕ. Отримано доказ збіжності розробленого дворівневого ітераційного алгоритму. Досліджено збіжність ітераційних процесів верхнього та нижнього рівнів. Запропоновано модифікований ітераційний процес верхнього рівня, який має збіжність за будь-яких параметрів лінійної та нелінійної підсхем системи БПЕ. Для підвищення ефективності алгоритму, на прикладі великоапертурних ректен, обґрунтовано способи врахування специфічних властивостей їх лінійних підсхем.

6. Отримані співвідношення для визначення зовнішніх параметрів систем БПЕ, що описують міжсистемну взаємодію та внутрішньосистемні процеси.

7. Встановлено, що розроблений підхід для аналізу та оптимізації систем БПЕ відрізняється широкими функціональними можливостями, універсальністю, що дозволяє узагальнити його на інші радіоелектронні системи (наприклад, системи МІМО, системи радіоелектронної боротьби) на етапі їхнього електродинамічного моделювання з наступним уточненням зовнішніх характеристик для конкретних типів РЕС.

8. Показано, що на основі розробленої нелінійної математичної моделі електродинамічного рівня системи БПЕ при певних умовах можна проводити аналіз і оптимізацію не тільки систем БПЕ в цілому, але і їх підсистем, окремих функціональних блоків і вузлів. Зокрема, були отримані нові результати в напрямку досліджень передавальних та приймальних підсистем систем БПЕ сфокусованим мікрохвильовим променем.

8.1. Отримала подальший розвиток теорія передавальних антен з нелійними характеристиками в зоні Френеля. Встановлено, що наявність нелінійності у випромінювачах призводить до утворення на їхніх поверхнях густини електричного струму на побічних частотах, це у свою чергу призводить до розфокусування електромагнітного випромінювання на основній частоті й значному розширенню зони Френеля поля побічного випромінювання. Тобто  $m$ -й частотній гармоніці відповідає своя довжина зони Френеля, яка росте зі збільшенням номера гармоніки й приблизно в  $m$  разів перевищує дальність передачі енергії. Таким чином, випромінювальні структури з нелійними властивостями на частотах гармонік можуть створювати в певних напрямках поля значної інтенсивності й суттєво

погіршувати функціонування інших РЕС, що перебувають навіть на значних відстанях від ректени.

8.2. Запропоновано варіант технічної реалізації систем БПЕ сфокусованим мікрохвильовим променем на основі передавальних БСВ. Використання БСВ в передавальних підсистемах, на відміну від однопозиційних антен, дозволяє розширити функціональні можливості і галузі застосування систем БПЕ. Це пов'язано з тим, що шляхом варіювання розмірами БСВ та числом випромінюючих в них позицій, на різних відстанях фокусування (відстанях передачі енергії) можна забезпечити однаковий режим збудження великоапертурних ректен і, отже, однакові їх характеристики по постійному струму.

8.3. Теоретично обґрунтована умова застосування наближення моделі нескінченних решіток для аналізу ВРР. Розглянута узагальнена схема ВРР й показано, що матриці, які характеризують її лінійну підсхему, володіють рядом специфічних особливостей, які необхідно враховувати при формуванні математичної моделі ВРР. Отримано рівняння стану для нескінченної ректенної решітки й доведено, що тільки у випадку періодичного або майже періодичного режиму збудження ректени, розрахунок її нелінійного режиму зводиться до обчислення на основній частоті й частотах вищих гармонік параметрів одного «еквівалентного» ПВЕ, якщо ПВЕ з'єднані по постійному струму з навантаженням або послідовно, або паралельно.

Отримані співвідношення для визначення зовнішніх параметрів і характеристик ВРР.

8.4. На основі наведеного доказу розроблена методика аналізу ВРР при рівномірному їх збудженні. Ця методика вельми ефективна, так як базується на використанні швидкодіючих алгоритмів і програм створених в ХНУРЕ, або з використанням існуючих комерційних пакетів САПР до складу яких входять модулі електродинамічного і схемотехнічного моделювання.

На базі розробленої методики проведена оцінка потенційних енергетичних характеристик ПВЕ у складі ректенної решітки в яких використовувалися однопівперіодні схеми випрямлення. На основі отриманих результатів сформульовані практичні рекомендації, щодо вибору випрямних діодів в ПВЕ для досягнення високих енергетичних характеристик, дотримуючись яких можна збільшити ККД випрямлення ПВЕ на 10–12 %.

8.4. Розроблена методика аналізу ВРР при нерівномірному їх збудженні. Порівняння результатів розрахунків по ній та відомих експериментальних даних підтвердило її вірогідність.

На прикладі моделювання системи БПЕ з передавальною БСВ викладений алгоритм аналізу та проектування ВРР.

За результатами моделювання були сформульовані практичні рекомендації, щодо подальшого підвищення енергетичних характеристик ВРР.

9. Результати дисертаційної роботи впроваджені в науково-дослідні роботи, які виконувалися в ХНУРЕ та ХНУ імені В.Н. Каразіна, а також в освітній процес кафедри КРіСТЗІ, що підтверджено відповідними актами про впровадження.

Підводячи остаточний підсумок про виконану роботу слід зазначити, що отримані у роботі результати науково обґрунтовані в рамках розробленої нелінійної



математичної моделі електродинамічного рівня системи БПЕ. Надійність отриманих результатів базується на числових розв'язках граничних задач електродинаміки у строгій постановці й на застосуванні широко апробованих відомих методів теорії антен з нелінійними характеристиками. Крім того, з метою контролю одержаних результатів у дослідженнях було проведено їх порівняльний аналіз з відомими з літератури окремими теоретичними та експериментальними даними.

## ПЕРЕЛІК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Крупноапертурные антенны-выпрямители систем беспроводной передачи энергии микроволновым лучом / В.М. Шокало, А.И. Лучанинов, А.М. Рыбалко, Д.В. Грециких. – Харьков: Коллегиум, 2006. – 308 с.

2. Достижения в исследовании крупноапертурных ректенн / В.М.Шокало, Д.В. Грециких, Д.С. Гавва, С. В. Помазанов. // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2006. – №146. – С. 198 – 214.

3. Performance of microwave wireless power transmission systems with non-optimal interception efficiency / V.M. Shokalo, A.M. Rybalko, A.A. Konovaltsev, M.A. Omarov, D.V. Gretsikh // Telecommunications and Radio Engineering. – 2007. – 66 (18). – P. 1667–1675 (**Scopus**).

4. Принцип зеркального отображения в антеннах с нелинейными элементами / А.И. Лучанинов, Д.С. Гавва, Д.В. Грециких, Е.В. Крикун. // Системы обработки информации. – 2007. – № 3 (61). – С. 53–56.

5. Методика расчета приемно-выпрямительных элементов ректенн систем беспроводной передачи энергии / Д.В. Грециких, А.В. Гомозов, В.А. Назаренко, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2011. – №4 (81). – С. 94–105.

6. Передающая подсистема беспроводной передачи энергии к труднодоступным объектам на основе многопозиционной системы излучателей с фокусировкой излучения (Часть 1) / А.В. Гомозов, В.И. Гомозов, В.М. Шокало, Д.В. Грециких, Ш.Ф.А. Аль-Самарай // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-тех. сб. – 2011. – №165. – С. 112–118.

7. Передающая подсистема беспроводной передачи энергии к 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. Всеукр. межвед. науч.-тех. сб. – 2011. – №167. – С. 18–24.

8. Возможность повышения энергоснабжения низкоорбитальных космических аппаратов при использовании беспроводной передачи энергии микроволновым лучом / А.В. Гомозов, Д.В. Грециких, А.В. Губа, А.В. Нарышев, Ш.Ф.А. Аль-Самарай, О.Л. Синько // Технология приборостроения. – 2011. – №2. – С. 27–33.

9. Principles of construction and application of microwave systems for wireless energy transmission of ground and space basing / A.V. Gomozov, V.M. Shokalo, D.V. Gretsikh, Sh.F.A Al-Sammarrai. // Computational problems of electrical engineering. – 2012. – V.2. № 1. – P. 15–23.

10. Области применения и современные тенденции развития наноректенн / *Д.В. Грецких, А.В. Гомозов, Н.М. Цикаловский, Ш.Ф.А. Аль-Самарай* // *Технология приборостроения*. – 2012. – №2. – С. 36–42.

11. 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. Всеукр. межвед. науч.-тех. сб.* – 2013. – №173. – С. 42–47.

12. Радиотехническая система беспроводного энергоснабжения беспилотных летательных аппаратов / *А.В. Гомозов, Д.В. Грецких, Н.М. Цикаловский, Е.В. Шарапова*. // *Космическая техника. Ракетное вооружение. Сб. науч.-техн. ст. ГП" КБ Южное"*. – 2015. – №1 (108). – Р. 36 – 41.

13. Mutual influence of carbon nanotubes / *A.I. Luchaninov, D.V. Gretsikh, E.A. Medvedev, A.S. Chemerovskyi*. // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2015. – №74(15). – Р. 1327–1341 (**Scopus**).

14. *Грецких Д.В.* Применение и перспективы развития беспроводной передачи энергии микроволновым лучом / *Д.В. Грецких, Н.М. Цикаловский, Е.И. Гладченко*. // *Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-тех. сб.* – 2016. – №184. – С. 7–25.

15. Mathematical Model of Large Rectenna Arrays for Wireless Energy Transfer / *D.V. Gretsikh, A.V. Gomozov, V.A. Katrich, A.I. Luchaninov, M.V. Nesterenko, Y.M. Penkin*. // *Progress In Electromagnetics Research B*. – 2017. – Vol. 74. – Р. 77–91 (**Scopus**).

16. Фокусировка электромагнитного излучения в средствах функционального поражения беспилотных летательных аппаратов средней и большой дальности / *А.В. Гомозов, Д.В. Грецких, Е.В. Шарапова, Н.М. Цикаловский*. // *Технология приборостроения*. – 2017. – № 1. – С. 3–8.

17. Средства функционального подавления радиоэлектронных средств малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с фокусировкой электромагнитного излучения / *А.В. Гомозов, Д.В. Грецких, А.В. Демченко, Н.М. Цикаловский*. // *Космическая техника. Ракетное вооружение. Сб. науч.-техн. ст. ГП " КБ Южное"*. – 2018. – №1. – С. 13–19.

18. Электродинамические устройства на основе радиоэлементов и материалов с нелинейными характеристиками / *Д.С. Гавва, Д.В. Грецких, А.В. Гомозов, Д.В. Пунин*. // *Технология приборостроения*. – 2018. – № 2. – С. 17–31.

19. Электродинамические устройства с нелинейными характеристиками / *Д.С. Гавва, Д.В. Грецких, А.В. Гомозов, А.Д. Преснякова*. // *Технология приборостроения*. – 2019. – № 1. – С. 20–35.

20. Внешние параметры систем беспроводной передачи энергии / *Д.В. Грецких, В.Г. Лихограй, А.А. Щербина, А.В. Гомозов* // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – 2019. – №199. – С. 59–66.

21. Система беспроводной передачи энергии с многопозиционной передающей подсистемой / *Д.В. Грецких, А.И. Лучанинов, А.В. Гомозов* // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – 2020. – №201. – С. 38–51.

22. Shokalo V.M. A model of receiving elements of MM waveband rectennas / *V.M. Shokalo, D.V. Gretsikh*. // *5<sup>th</sup> International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'05)*. – 2005. – Р. 248–250 (**Scopus**).

23. Результаты исследований, проводимых ХНУРЭ, в области разработки современных телекоммуникационных систем / [А.И. Лучанинов, В.М. Шокало, Д.В. Грецких и др.]. // Молодежь и современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций (РТ-2006). – 2006. – С. 6–9.

24. New research results of nonlinear effects and spectral efficiency in the radio channels of the modern communication systems / [V.M. Shokalo, A.I. Luchaninov, D.S. Gavva, D.V. Gretskih at al.]. // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2006). – 2006. – P. 512–514 (**Scopus**).

25. Принцип зеркального отображения в антеннах с нелинейными элементами / А.И. Лучанинов, Д.С. Гавва, Д.В. Грецких, Е.В. Крикун. // Матеріали третьої наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – 2007. – С. 126–12.

26. Antenna-rectifier for power supply subsystem of low-small spacecraft / D.V. Gretskih, A.V. Gomozov, V.M. Shokalo, Sh.F.A. Al-Sammarraie. // VIII International conference on antenna theory and techniques (ICATT'11). – 2011. – P. 315–317 (**Scopus**).

27. 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. Грецких, 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» – 2011. – Том I. – С. 365–370.

28. Principles of construction and application of modern microwave wireless energy transmission systems / A.V. Gomozov, V.M. Shokalo, D.V. Gretskih, Sh.F.A. Al-Sammarraie, O.S. Lukavenko // Modern problems of radio engineering telecommunications and computer science (TCSET'2012). – 2012. – P. 27–29 (**Scopus**).

29. 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 // СВЧ-техника и информационные технологии (КрыМиКо'2012). – 2012. – Том II. – P. 921–922 (**Scopus**).

30. Researches of receiving-rectifying element of the rectennas for wireless power transmission systems to remote objects / D.V. Gretskih, A.V. Gomozov, A.A. Storageev, Sh.F.A. Al-Sammarraie // IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'13). – P.552–554 (**Scopus**).

31. Wireless radio power supply system for pilotless aircrafts / D.V. Gretskih, A.V. Gomozov, N.M. Tsikalovskiy, E.V. Sharapova. // 10<sup>th</sup> International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'15). – 2015. – P. 202–204 (**Scopus**).

32. Mathematical model of large aperture rectenna lattice / D.V. Gretskih, A.V. Gomozov, A.I. Luchaninov, M.V. Nesterenko. // XXI International seminar/workshop on direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic wave theory (DIPED–2016). – 2016. – P. 92–94 (**Scopus**).

33. Functional Neutralization of Small-size UAVs by Focused Electromagnetic Radiation / A.V. Gomozov, D.V. Gretskih, V.A. Katrich, M.V. Nesterenko. // XXII International seminar/workshop on direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic wave theory (DIPED–2017). – 2017. – P. 187–189 (**Scopus**).

34. Impact of non-linear switch characteristics on the reconfigured antenna properties / D.S. Gavva, A.A. Strelnitskiy, D.V. Gretskih, D.Yu. Gorelov, E.A. Medvedev. // 14<sup>th</sup> International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET–2018). – 2018. – P. 591–596 (**Scopus**).

35. Electrodynamic Model of a Wireless Power Transmission System / D.V. Gretskih, A.I. Luchaninov, J.V. Vishniakova, V.A. Katrich, M.V. Nesterenko. // XXIII International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED–2018). – 2018. – P. 80–85 (**Scopus**).

36. Electrodynamic Approach to Designing WPT Systems with Accounting for Non-system Interactions / A.I. Luchaninov, D.V. Gretskih, A.V. Gomozov, V.A. Katrich, M.V. Nesterenko. // IEEE 2<sup>nd</sup> Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON-2019. – 2019. – P. 80–85 (**Scopus**).

37. Electrodynamic Approach to Designing Wireless Power Transfer Systems (Internal System Processes) / D. Gretskih, A. Luchaninov, V. Katrich, M. Nesterenko. // IV International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019). – 2019. – P. 1–6 (**Scopus**).

38. External Parameters of Wireless Power Transmission Systems / D. Gretskih, A. Luchaninov, A. Gomozov, V. Katrich, M. Nesterenko. // XXIV International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED-2019). – 2019. – P. 117–121 (**Scopus**).

39. UWB Antenna for Specrum Monitoring Systems / A. Luchaninov, V. Lykhograi, A. Scherbina, D. Gretskih // 15<sup>th</sup> International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET–2020). – 2020. – P. 591–596 (**Scopus**).

40. Modeling the WPT system with the multistate transmitting subsystem / D. Gretskih, A. Luchaninov, A. Gomozov, V. Katrich, M. Nesterenko // Proceedings of the 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week. – 2020. – P. 110–115 (**Scopus**).

41. Nonlinear integral equations for multi-input radiating structures / D. Gretskih, A. Luchaninov, V. Aliksieiev, V. Katrich, M. Nesterenko // Proceedings of the XXV International Seminar on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory. – 2020. – P. 97–102 (**Scopus**).

42. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч.1. Основи теорії електромагнітного поля / В.М. Шокало, В.І. Правда, В.А. Усін, В.С. Вунтесмері, Д.В. Грецьких. – Харків: Колегіум, 2009. – 286 с.

43. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч.2. Випромінювання та поширення електромагнітних хвиль / В.М. Шокало, В.І. Правда, В.А. Усін, В.С. Вунтесмері, Д.В. Грецьких. – Харків: Колегіум, 2010. – 435 с.

44. Поля і хвилі в системах технічного захисту інформації. Ч.1. / В.М. Шокало, В.А. Усін, В.С., Д.В. Грецьких, В.О. Хорошко, Л.П. Крючкова. – Харків: Колегіум, 2013. – 456 с.

## АНОТАЦІЯ

**Грецьких Д.В. Розвиток теорії систем безпроводної передачі енергії.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.07 – антени та пристрої мікрохвильової техніки. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2021.

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової проблеми, яка полягає в необхідності розроблення строгих методів аналізу та оптимізації систем безпроводної передачі енергії (БПЕ) в яких використовуються різні технології передачі енергії.

Запропоновано новий підхід, а також розроблено нелінійну математичну модель електродинамічного рівня системи БПЕ на основі теорії багатовходових антен з нелінійними характеристиками. Розроблена модель має достатню універсальність та гнучкість, тобто дозволяє проводити аналіз й оптимізацію систем БПЕ в яких використовуються різні технології передачі енергії та їх окремих підсистем і пристроїв. Адекватність розробленої моделі доведена шляхом порівняння результатів розрахунків з відомими експериментальними даними.

Використовуючи розроблену модель системи БПЕ вирішені окремі задачі. Зокрема, удосконалена теорія передавальних антен з нелінійними характеристиками для зони Френеля. Теоретично доказані умови застосування наближення нескінченних решіток для аналізу великоапертурних ректенних решіток. На основі отриманого доказу розроблена методика аналізу великоапертурних ректенних решіток, які збуджуються електромагнітним полем з нерівномірним амплітудним розподілом.

На прикладі моделювання системи БПЕ з передавальної багатопозиційною системою випромінювачів наведена послідовність проектування великоапертурних ректенних решіток, розроблені практичні рекомендації побудови ефективних схем збору потужності постійного струму ректени, сформульовані подальші напрямки розвитку теорії та практики побудови систем БПЕ і їх ректен.

**Ключові слова:** система безпроводної передачі енергії, технологія передачі енергії, ректена, внутрішньосистемні процеси, міжсистемна взаємодія, матриця розсіяння, інтегральні рівняння, зовнішні параметри, багатопозиційна система випромінювачів.

## АННОТАЦИЯ

**Грецьких Д.В. Развитие теории систем беспроводной передачи энергии.** – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.07 «Антенны и устройства микроволновой техники». – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2021.

В диссертационной работе решена актуальная научно-прикладная проблема развития методов анализа и оптимизации систем беспроводной передачи энергии (БПЭ) в которых используются различные технологии передачи энергии. Проблема решена путем разработки новой более корректной математической модели,

учитывающей всю совокупность нелинейных эффектов, возникающих в системах БПЭ из-за наличия в их антеннах и антенных трактах элементов с нелинейными характеристиками, позволяющей полностью описать электромагнитные процессы, происходящие в самой системе БПЭ и учесть ее электродинамическое взаимодействие с другими радиоэлектронными системами (РЭС).

Согласно поставленной цели в диссертационной работе решены следующие задачи.

Проведен анализ существующих решений в области БПЭ, в частности рассмотрены различные развивающиеся в настоящее время технологии беспроводной передачи энергии и проведен обзор современного состояния теории и практики построения ректен (антенн-выпрямителей). На основе проведенного анализа литературных источников предложен вариант классификации систем БПЭ по различным конструктивным, технологическим, эксплуатационным и другим признакам.

Обосновано, что для анализа и оптимизации систем БПЭ в которых применяются различные технологии передачи энергии можно применить универсальный вычислительный алгоритм. Для реализации этого алгоритма в работе была разработана нелинейная математическая модель электродинамического уровня системы БПЭ, в основу которой положена модель многовходовых антенн с нелинейными элементами. Разработанная модель позволяет корректно описать электродинамические процессы с учетом всей совокупности нелинейных эффектов, которые возникают в самой системе БПЭ, так и эффектов, возникающих за счет межсистемных взаимодействий, то есть взаимодействия системы БПЭ с другими РЭС и наоборот. Адекватность разработанной математической модели подтверждена результатами сравнения с известными экспериментальными данными.

На основе разработанной нелинейной математической модели электродинамического уровня системы БПЭ были решены следующие частные актуальные задачи.

Усовершенствована теория многовходовых передающих излучающих структур с нелинейными характеристиками для зоны Френеля, что позволяет оценить влияние возникающих в передающих подсистемах вредных нелинейных эффектов на характеристики электромагнитной совместимости и параметры самой системы БПЭ.

Предложена концепция построения систем БПЭ к труднодоступным объектам на расстояниях прямой видимости, которая отличается от традиционной, использованием в передающей подсистеме многопозиционных систем излучателей (МСИ) с фокусировкой электромагнитного излучения. Показано, что системы БПЭ с МСИ позволяют решить целый ряд задач невыполнимых для систем БПЭ с однопозиционными передающими антеннами при одинаковых условиях их работы (мощность излучения, дальность передачи энергии, режим возбуждения крупноапертурной ректенны).

Получил дальнейшее развитие метод анализа крупноапертурных ректенных решеток (КРР) при равномерном их возбуждении. Доказано, что расчет нелинейного режима КРР в приближении бесконечной решетки возможен при периодическом

или почти периодическом режиме ее возбуждения и сводится к вычислению на основной частоте и частотах высших гармоник параметров одного эквивалентного приемно-выпрямительного элемента (ПВЭ). На основании проведенного доказательства разработан эффективный алгоритм анализа КРР на базе существующих пакетов САПР с помощью которого была решена задача оценки потенциальных характеристик ПВЭ. В результате решения данной задачи изложены рекомендации по выбору выпрямительных диодов ПВЭ.

Разработана методика анализа КРР с неравномерно облучаемой апертурой. Суть которой заключается в том, что при определении параметров ректенны за счет аппроксимации реально медленно меняющегося амплитудного распределения кусочно-ступенчатыми функциями ее апертура представляется в виде ряда концентрических зон, рассматриваемых как бесконечные решетки при свойственных им уровнях возбуждения. На примере моделирования системы БПЭ с передающей МСИ изложена последовательность проектирования КРР, разработаны практические рекомендации построения эффективных схем сбора мощности постоянного тока ректенны, сформулированы дальнейшие направления развития теории и практики построения систем БПЭ и их ректен.

**Ключевые слова:** система беспроводной передачи энергии, технология передачи энергии, ректенна, внутрисистемные процессы, межсистемное взаимодействие, матрица рассеяния, интегральные уравнения, внешние параметры, многопозиционная система излучателей.

## ABSTRACT

**Gretskih D.V. Development of the theory wireless power transmission systems.** – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of doctor of technical sciences on specialty 05.12.07 « Antennas and microwave devices». – Kharkiv national university of radio electronics, Kharkiv, 2021.

The dissertation provides a theoretical generalization and a new solution to a scientific problem, which consists in the need to develop rigorous methods for the analysis and optimization of wireless power transmission systems (WPT) in which various power transmission technologies are used.

A new approach is proposed, and a nonlinear mathematical model of the electrodynamic level of the WPT system is developed based on the theory of multi-input antennas with nonlinear characteristics. The developed model has sufficient versatility and flexibility, that is, it allows analysis and optimization of WPT systems in which various energy transfer technologies and their individual subsystems and devices are used. The adequacy of the developed model has been proven by comparing the calculation results with known experimental data.

Using the developed model of the WPT system, individual problems have been solved. In particular, an improved theory of transmitting antennas with non-linear characteristics for the Fresnel zone. The conditions for the application of the approximation of infinite lattices for the analysis of large-aperture rectennas are theoretically proved. On the basis of the obtained evidence, a technique has been

developed for the analysis of large-aperture rectennas, which are excited by an electromagnetic field with an uneven amplitude distribution.

On the example of modeling a WPT system with a multi-position transmitting system of radiators, the stages of designing large-aperture rectennas are outlined, practical recommendations for the construction of effective rectenna DC power collection schemes are developed, further directions for the development of the theory and practice of constructing WPT systems and their rectennas are formulated.

**Key words:** wireless power transmission system, power transmission technology, rectenna, intrasystem processes, intersystem interaction, scattering matrix, integral equations, external parameters, multiposition system of radiators.



Підп. до друку 31.03.21.  
Умов. друк. арк. 2,3  
Зам. № 2-197

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Тираж 100 прим.  
Ціна договірна.

Спосіб друку – ризографія.

---

ХНУРЕ, 61166, м. Харків, просп. Науки, 14

---

Віддруковано в редакційно-видавничому відділі ХНУРЕ  
м. Харків, просп. Науки, 14

