

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Грецьких Дмитра Вячеславовича “Розвиток теорії систем безпровідної передачі енергії”, подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.07 – антени та пристрої мікрохвильової техніки

**1. Актуальність теми дисертації.** Безпровідна передача енергії (БПЕ) є одним з актуальних напрямків, який в даний час активно вивчається і широко впроваджується в різні сфери життєдіяльності. Вона поділяється на індуктивну (у ближній зоні) та хвилеву (проміжна та дальня зони). Стало розвиваються технології безпровідного енергопостачання малопотужних пристроїв (які вже серійно випускаються рядом відомих фірм) за рахунок вилучення електромагнітної енергії з навколишнього простору і перетворення її в постійний струм. Очікується, що в найближчій час індустрія БПЕ буде неухильно зростати і в напрямку створення потужних систем БПЕ сфокусованим мікрохвильовим променем. Існують наміри кількох країн (США, Японії та Китаю) в найближчому майбутньому здійснити передачу енергії сфокусованим мікрохвильовим променем, яку вироблено сонячними космічними електростанціями, на наземні антени-випрямлячі (ректени). Проводяться інтенсивні теоретичні та експериментальні дослідження перспективного класу систем БПЕ призначених для енергопостачання мікрохвильовим променем безпілотних літальних апаратів різного класу і призначення. Освоєння космічного простору також потребує розвитку БПЕ. Ще один актуальний напрямок, – перетворення оптичного випромінювання в постійний струм з допомогою наноректен, які в перспективі можуть стати альтернативою сонячним батареям, але з кращими енергетичними характеристиками.

Ефективне проектування та подальше практичне впровадження таких систем БПЕ залежить від того, наскільки точно вдається моделювати фізичні процеси, що відбуваються в них. Суттєві особливості систем БПЕ полягають в тому, що процеси в них мають надто складний характер через наявність в системах БПЕ антен з нелінійними властивостями. Тому без розвитку теорії систем БПЕ проведення системного і детального аналізу різних ефектів, що виникають в них, неможливо.

У зв'язку з цим тема дисертаційної роботи Грецьких Д.В. безперечно є актуальною, тому що в ній розглядається широке коло питань, присвячених розробці строгого обчислювального апарату для вивчення процесів, що відбуваються в системах БПЕ та в окремих їх функціональних блоках, які мають у своєму складі антени з нелінійними властивостями. Актуальність теми підтверджується і її зв'язком з планами наукових робіт, які виконуються Харківським національним університетом радіоелектроніки та Харківським національним університетом імені В.Н. Каразіна в межах ряду науково-дослідницьких робіт.

**2. Короткий аналіз змісту дисертаційної роботи.** Дисертація складається зі списку використаних скорочень, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел і трьох додатків. Основний текст містить 250 сторінок і включає 98 рисунків, 6 таблиць. Титульний лист, анотації та список праць здобувача розташовані на 13 сторінках. Список використаних джерел містить 303 найменування на 32 сторінках. Додатки містять 15 сторінок.

**У першому розділі** проведено аналітичний огляд наукових публікацій за темою дисертації. Введена класифікація систем БПЕ за способом передачі енергії та іншими ознаками. Приведено огляд робіт ХНУРЕ за даною тематикою. На основі аналізу стану проблеми сформульовано задачі дисертаційних досліджень.

**У другому розділі** удосконалено теоретичний розгляд системи БПЕ як пов'язаної системи лінійних та нелінійних багатополіусників, які взаємодіють через струми, напруги та падаючі та відбиті хвилі на багатьох частотах, в тому числі і тих, що породжуються у системі. Записана система матричних рівнянь, розв'язання яких надає вектор вихідних станів системи, що робить задачу розрахунку БПЕ формалізованою і втілює в собі шлях фізичного та технічного вивчення складної системи.

*Новим у розділі є нелінійна математична модель системи БПЕ та обґрунтування вибору вектору вхідних параметрів системи БПЕ.*

**У третьому розділі** деталізовано розрахунок блоків матриць розсіяння випромінювальних структур загальної моделі БПЕ на основі електромагнітного опису (метод інтегральних рівнянь) з урахуванням втрат в випромінювачах для їх довільної конфігурації. Це доводить математичний апарат до конкретного розрахунку параметрів систем БПЕ, що є наслідком розробки обчислювального алгоритму електродинамічного аналізу для блоків узагальненої моделі.

*Новим в розділі є співвідношення для матриць випромінювальної системи в прийнятих допущеннях, які не обмежують загальність підходу до аналізу повної системи БПЕ. Показано виконання законів збереження у процесах, що розраховуються за запропонованим методом.*

**У четвертому розділі** вирішується питання визначення зовнішніх параметрів системи, в частотній області розглядаються параметри взаємодії як внутрішньосистемних та і міжсистемних. Враховуючи велику кількість нелінійних елементів, застосування типових алгоритмів, наприклад методу гармонійного балансу, стає дуже ускладненим. В роботі було запропоновано використовувати метод декомпозиції, що має підґрунтя у наявності різного ступеня взаємодії нелінійних елементів, що знаходять на різних відстанях один від одного. Це дозволяє у підсумку спростити вимоги до обчислювальних ресурсів, потрібних для вирішення задачі. Розглядається збіжність ітера-

ційного процесу розв'язування задачі. Розроблений алгоритм перевірявся у розрахунках експериментальних прототипів систем БПЕ.

*Новим у розділі є алгоритм розрахунку системи з великою кількістю елементів (в тому числі нелінійних) та отримання умов збіжності ітераційного процесу розрахунку. Також перевірка запропонованого методу на відомих результатах експериментів з системами БПЕ.*

**У п'ятому розділі** розглядаються питання побудови передавальної підсистеми БПЕ для яких принциповим є вирішення нелінійної задачі взаємодії електромагнітних хвиль з системою з урахуванням перетворення енергії та частоти. До того ж задача розглядається при розміщені у зоні Френеля іншої складної підсистеми – приймальної. Отримані дані про вплив нелінійних властивостей передавальних підсистем на характеристики системи БПЕ та її випромінювання у навколишній простір. Розглядаються параметри запропонованих багатопозиційних передавальних підсистем на характеристики систем БПЕ.

*Новим у розділі є метод та результати моделювання передавальних підсистем з нелійними елементами та багатопозиційних передавальних підсистем систем БПЕ.*

**У шостому розділі** розглядаються процеси у великоапертурних решітках ректен при рівномірному збудженні. Визначені умови виконання наближення нескінчених решіток та отримані співвідношення для визначення зовнішніх параметрів таких ректен. Показано залежність параметрів ректен від схем збору постійного струму.

*Новим у розділі є рівняння стану, що отримані для нескінченної ректенної решітки та з'ясовано умови спрощення розгляду до одного «еквівалентного» приймально-випрямного елемента. Отримані співвідношення для визначення зовнішніх параметрів великоапертурних ректених решіток. Отримано вплив вольтамперних параметрів діодів на енергетичні характеристики приймально-випрямного елемента.*

**У сьомому розділі** розглядається реалістичний випадок нерівномірного збудження великоапертурних ректен, для виявлення особливостей взаємодії досліджується система ідентичних випрямних елементів та обраховується коефіцієнт корисної дії при зміні параметрів перетворення енергії. Результати розрахунку перевірялися порівнянням з експериментом.

*Новим у розділі є розроблений апарат моделювання таких випадків збудження ректен, теоретичний та експериментальний розгляд прототипу ректени та результати цих досліджень.*

**3. Ступінь обґрунтованості і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації визначена коректним використанням сучасних математичних

методів теорії антен з нелінійними властивостями. Адекватність розроблених математичних моделей підтверджена шляхом порівняння теоретичних розрахунків з експериментальними даними інших авторів. Спостерігається їх гарний збіг.

**4. Наукова новизна результатів дослідження.** Як показав детальний аналіз дисертаційної роботи, найважливіші, оригінальні результати її, наукова новизна визначаються наступними положеннями.

1). До нових, по-перше, належать результати по розробці методу аналізу нелінійних процесів на електродинамічному рівні системи БПЕ, який на відміну від відомих дозволяє проводити всебічний аналіз нелінійних ефектів в системах БПЕ в яких використовуються різні технології передачі енергії.

2). Новими також слід вважати співвідношення для визначення блоків матриці розсіяння випромінювальної структури системи БПЕ, що в загальному випадку складається з систем випромінювачів довільної конфігурації, що працюють в режимах передачі, приймання та розсіювання, які отримані шляхом розв'язку строгої граничної задачі електродинаміки. На відміну від відомих, отримані у роботі співвідношення дозволяють описати не тільки фізичні процеси, що протікають в самій системі БПЕ, але й врахувати електродинамічний зв'язок системи БПЕ з іншими радіотехнічними системами.

3). Безперечний науковий інтерес викликають результати пов'язані з розробкою ефективного алгоритму для розв'язання рівнянь стану систем БПЕ, випромінювальної структури яких містять значну кількість нелінійних елементів (НЕ). Тому що відомі алгоритми дозволяють успішно аналізувати антени, що містять близько десятка НЕ, з утриманням при цьому 5...7 спектральних складових струмів або напруг, а розроблений алгоритм значно розширює можливості чисельного аналізу нелінійного режиму, так як дозволяє аналізувати випромінювальні структури, що містять кілька десятків (а деякі і сотні) НЕ з урахуванням до десяти-двадцяти спектральних складових на кожному НЕ.

4). Здобувачем також досліджені нові шляхи побудови систем БПЕ сфокусованим мікрохвильовим променем, які на відміну від відомих мають більш широкі функціональні можливості, що дозволяє значно розширити галузі їх застосування. Дослідження провадилися в рамках розробленої нелінійної теорії системи БПЕ, в ході цих досліджень показано, що розроблена модель універсальна, і придатна для аналізу не тільки систем БПЕ в яких використовуються різні технології передачі енергії, а й їх окремих складових – передавальних підсистем, приймальних підсистем (ректен в цілому та їх приймально-випрямних елементів зокрема).

Вищевикладене становить наукову новизну результатів дисертаційної роботи та висновків, що виносяться на захист.

**5. Значимість результатів для науки і практики.** Цінність проведених в дисертації досліджень для науки і практики незаперечна і полягає в наступному: розвинута теорія дозволяє проводити строгий аналіз та оптимізацію систем БПЕ різного класу та призначення, що відіграє вирішальну роль:

при подальшій практичній реалізації потужних систем БПЕ сфокусованим мікрохвильовим променем за рахунок істотного скорочення обсягу експериментальних досліджень складних систем БПЕ;

при проектуванні перспективних радіотехнічних систем з одночасною передачею енергії та інформації;

при оцінці (ще на етапах комп'ютерного моделювання) параметрів систем БПЕ, до складу яких входять антени з нелінійними властивостями, що працюють в електромагнітній обстановці близькій до реальної.

Важливими для практичного використання є також і отримані знання, які встановлюють потенційні можливості приймально-випрямних елементів великоапертурних ректенних решіток з урахуванням нелінійних ефектів, що впливають на процеси їх функціонування.

Сукупність одержаних результатів слід класифікувати як розвиток теорії, орієнтованої на вирішення проблеми дослідження характеристик систем БПЕ в яких використовуються різні технології передачі енергії, та створення нового покоління систем БПЕ і удосконалення існуючих.

Одержані в дисертації основні результати, висновки та рекомендації можна рекомендувати для впровадження в відповідні науково-дослідні інститути та підприємства, зокрема аерокосмічної тематиці, та в навчальні дисципліни для студентів радіотехнічних та радіофізичних факультетів вищих навчальних закладів.

**6. Підтвердження повноти викладу основних результатів дисертації в наукових фахових виданнях.** Здобувач повністю виклав основні результати дисертаційних досліджень в 41 науковій праці на які є посилання в тексті дисертаційної роботи.

Основні наукові результати за темою дисертації опубліковано у 1 монографії та у 20 статтях (з них 17 – у науково-технічних журналах, включених до переліку Атестаційної колегії Міністерства освіти і науки України, 3 – у зарубіжних науково-технічних журналах, які індексовані наукометричною базою Scopus).

Апробацію та обговорення матеріалів дисертації проведено на 20 наукових міжнародних та вітчизняних конференціях, форумах і семінарах, як в Україні, так і за кордоном у збірниках яких опубліковано 20 тез доповідей (з них 17 індексовані наукометричною базою Scopus).

**7. Відповідність змісту дисертації спеціальності 05.12.07 – антени та пристрої мікрохвильової техніки.** У роботі широко описано підхід для ана-

лізу основних особливостей, що виникають в системах БПЕ до складу яких входять антени та тракти їх живлення з нелінійними властивостями. За своєю суттю дисертаційна робота Грецьких Д.В. повністю відповідає паспорту спеціальності 05.12.07.

Структура дисертації, її оформлення відповідає необхідним вимогам. Стиль мови загальноприйнятій у науковій літературі. Автореферат вірно передає зміст дисертаційної роботи.

#### **8. Зауваження та недоліки.** На жаль, у роботі є недоліки.

1). У підрозділі 1.1. здобувач зазначив, що у роботі не розглядається індукційний спосіб передачі енергії, однак в підрозділі 4.5.2. для перевірки адекватності запропонованої моделі та методики аналізу систем БПЕ був проведений розрахунок за розробленою моделлю і порівняння з експериментальними результатами, які отримані різними авторами для систем БПЕ саме з індукційним способом передачі енергії. Цікаво, що результати розрахунку за запропонованою здобувачем моделлю краще збігаються з експериментальними результатами, ніж результати моделювання, отримані іншими авторами (наприклад, рис. 4.12). Тому здобувачеві слід було у роботі зробити акценти на існуючі методи аналізу систем БПЕ з індукційним способом передачі енергії та виділити їх переваги і недоліки в порівнянні з розробленою моделлю.

2). Розроблена нелінійна математична модель системи БПЕ дозволяє врахувати електродинамічний зв'язок досліджуваної системи з іншими радіоелектронними системами. Однак ця модель має деякі обмеження, тому що взаємодіючі системи повинні перебувати в дальній зоні один одного, а випадки коли ці взаємодіючі системи можуть перебувати в ближній або проміжній зонах один одного здобувачем не розглядалися.

3). У висновку до розділу 7 здобувач зазначає, що одним з шляхів збільшення ККД випрямлення в крайніх зонах великоапертурної ректени збуджуваної електромагнітною хвилею з нерівномірним амплітудним розподілом є використання випрямних схем, які застосовуються в технологіях перетворення малопотужних електромагнітних полів у постійний струм. Але ж у роботі не було показано який при цьому буде вигаш в ККД випрямлення та чи доцільно ускладнювати схему випрямлення. Тому здобувачеві слід було б спочатку провести порівняльний аналіз різних схем випрямлення ректенних елементів, а потім лише робити рекомендації щодо підвищення ККД випрямлення за рахунок вибору тієї чи іншої схеми випрямлення.

4). У загальних висновках автореферату не повністю висвітлений кількісний аналіз отриманих результатів.

**9. Висновок.** Дисертація Грецьких Д.В. є самостійною роботою і являє собою завершене наукове дослідження, в якому на основі проведених авто-

ром досліджень сформульовані та обґрунтовані основні ідеї, положення і результати, що виносяться на захист, мають цінність для науки і практики при розробці не тільки систем БПЕ, а й різних класів антенних систем з нелінійними властивостями. Широта і глибина досліджень, організованих в роботі, свідчать про високий науковий потенціал Грецьких Д.В., який здатний самостійно вирішувати важливі наукові проблеми в галузі радіотехніки.

На підставі вищевикладеного можна зробити висновок, що дисертація здобувача на тему “Розвиток теорії систем безпроводної передачі енергії” відповідає вимогам “Порядку присудження наукових ступенів”, які пред’являються до докторських дисертацій, а її автор Грецьких Дмитро Вячеславович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.07 – антени та пристрої мікрохвильової техніки.

Офіційний опонент

д.т.н., професор, в.о. завідувача кафедри  
радіофізики та кібербезпеки Донецького  
національного університету імені  
Василя Стуса МОН України

  
В.Г. Крижановський

