

67-72-28/1  
30.06.2020

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Теплякова Івана Юрійовича на тему «Підвищення ефективності ребристо-стержневої випромінювальної структури з використанням плазмового розряду», яку подано на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – «Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій»

**1. Актуальність теми дисертації.** Стрімкий розвиток сучасних інформаційно-комп'ютерних, інфокомунікаційних та телекомунікаційних технологій в останні роки в значній мірі був зумовлений вагомими теоретичними та експериментальними дослідженнями в області плазмоніки. Це можна пояснити унікальними фізичними властивостями плазмонів та плазми, як перспективних засобів передачі інформації, зокрема особливу практичну цінність представляють ефекти, що спостерігаються під час їхнього застосування. Як наслідок для дослідників відкриваються нові можливості розроблення нових та вдосконалення існуючих засобів інфокомунікаційних систем, що базуються на використанні плазми, здатної поширювати інформаційні процеси.

Традиційні метал-діелектричні структури довгий час були незамінними під час розроблення НВЧ пристрій та приладів, що обґрунтовається їхньою надійністю, дешевизною та простотою виготовлення. Застосування плазмового розряду в антенних системах, зокрема в антенах поверхневих хвиль, забезпечує суттєвий ряд переваг над звичайними металевими, діелектричними та метал-діелектричними антенами. Крім того актуальною та недостатньо вивченою лишається задача покращення параметрів та характеристик випромінювання антен поверхневих хвиль зі складним профілем поверхневого імпедансу, шляхом використання плазмового розряду елементом конструкції. Вирішенню цієї проблеми присвячена дисертаційна робота Теплякова І. Ю., в якій постає питання підвищення ефективності випромінювання ребристо-стержневої структури, як ключового конструктивного компонента для виготовлення широкого класу антен поверхневої хвилі, в яких поверхневий імпеданс змінюється уздовж структури за періодичним законом, що уможливлюється заміною металевого стержня плазмовим розрядом.

Використання ребристо-стержневих структур в радіотехнічних засобах нині представляє вагомий інтерес, оскільки її вживання зумовлене розв'язком широкого кола прикладних задач, що досягається завдяки особливим фізичним ефектам, пов'язаних з взаємодією поверхневих хвиль та ребристої структури. Зокрема в дисертаційній роботі обґрунтовано доцільність використання ребристо-стержневих структур, виконаних на базі плазмового розряду, для розроблення антенних систем прихованого радіозв'язку, а також засобів інтерферометрії.

Отже, вдосконалення параметрів та характеристик випромінювання ребристо-стержневих структур за допомогою використанням плазмового розряду, як конструктивного компонента, є актуальним науково-практичним завданням.

**2. Структура та зміст дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і 4 додатків. Загальний обсяг роботи 182 сторінки, з них 113 сторінок – основного тексту. Дисертація містить 61 рисунок і 10 таблиць. Список використаних джерел нараховує 117 найменувань.

**У вступі** обґрунтовано актуальність роботи; сформульовано мету, завдання, методи, об'єкт та предмет дослідження; сформульовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів; висвітлено особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів, наведено дані про публікації та апробацію результатів дисертації; надано інформацію про структуру та обсяг роботи.

**У першому розділі** проведено огляд сучасного стану розвитку приладів та пристройів, принцип роботи яких оснований на використанні властивостей поверхневих плазмонів і плазми та проаналізовано місце цієї роботи в загальному доробку праць зарубіжних та українських науковців за тематикою кандидатської дисертаційної роботи. Зокрема увагу присвячено дослідженням антенних систем, що належать до класу антен поверхневої хвилі, оскільки саме вони за фізичними параметрами та принципом роботи близькі до ребристо-стержневих структур. Таке дослідження дало змогу автору кандидатської дисертаційної роботи навести та обґрунтувати шляхи підвищення ефективності ребристо-стержневої випромінювальної структури. Для цього було запропоновано використання плазмового розряду замість металевого стержня. Крім того дисертант вважає, що для експериментальних досліджень доцільно використовувати люмінесцентну газорозрядну лампу, як конструктивний компонент ребристо-стержневої структури.

Окрему увагу присвячено вивченю та аналізу фізичних параметрів газорозрядної плазми, таких як діелектричної проникності плазми, плазмової частоти та провідності плазми. Таке дослідження дає змогу використати набуті знання для подальших вивчень ребристо-стержневої структури під час імітаційного моделювання.

**Другий розділ** присвячений математичному моделюванню, за допомогою якого досліджено особливості формування розподілу електричної складової електромагнітного поля в дальній зоні ребристо-стержневої структури. Розв'язання цієї науково-практичної проблеми досягнуто застосуванням двох методик, що описані відповідно у першому та у другому підрозділах.

У першому підрозділі за допомогою використання математичної моделі, яка є аналітичним розв'язком неоднорідного інтегрального рівняння Фредгольма другого роду, досліджено вплив параметрів поверхневого імпедансу періодично-

модульованої циліндричної за формою метал-діелектричної структури на розподіл вектора напруженості електричного поля в дальній зоні. Результати дослідження показано у вигляді серії нормованих за амплітудою діаграм спрямованості в прямокутній системі координат. Таке дослідження дало змогу у першому наближенні визначити конструктивні параметри поверхневого імпедансу ребристо-стержневої структури, а саме: амплітуду, ширину та період металевих радіальних неоднорідностей. Ця математична модель описує нескінченно довгі модульовані метал-діелектричні структури, відповідно така модель не враховує відбути від кінця структури зворотну поверхневу хвилю. В дисертаційній роботі зазначено, що використання цієї математичної моделі забезпечує високу точність розрахунку розподілу вектора напруженості електричного поля в дальній зоні при умові, що відносні розміри досліджуваних структур більше  $10\lambda_0$ , через що дисертант наводить інший метод дослідження розподілу поля в дальній зоні ребристо-стержневої структури, який здатний врахувати зворотну поверхневу хвилю.

Другий підрозділ присвячений рішенню задачі аналізу ребристо-стержневої структури методом наведених електро-рушійних сил, яка, на відміну від попередньо вивченої математичної моделі модульованої метал-діелектричної структури, характеризується скінченими розмірами. Дисертантом розроблено програмний засіб з використанням інтерпретованої мови програмування високого рівня «Python» для автоматизації рішення задачі аналізу ребристо-стержневої структури. Обговорено результати розрахунку розподілу вектора напруженості електричного поля в дальній зоні, отриманих на основі методу наведених електро-рушійних сил. Це дослідження дало можливість запропонувати конструктивні параметри поверхневого імпедансу ребристо-стержневої структури, використання яких забезпечує поперечний розподіл електричного поля в дальній зоні відносно осі досліджуваної структури.

У третьому розділі на основі результатів, отриманих у попередньому розділі, розроблено імітаційну модель ребристо-стержневої структури довжиною  $4\lambda_0$  у програмному середовищі HFSS, що дало змогу провести дослідження електродинамічних параметрів на основі методу скінчених елементів. Розроблено матеріал середовища газорозрядної плазми з використанням теорії Друде, вивчення якої виконано у першому розділі цієї дисертаційної роботи. Новизною такої імітаційної моделі є те, що вона дозволяє врахувати і дослідити вплив параметрів газорозрядної плазми на параметри та характеристики випромінювання ребристо-стержневої структури.

Дисертантом виявлено, що в дальній зоні форма розподілу електромагнітного поля залежить від конструктивних параметрів, а також від наявності або відсутності плазмового розряду в ребристо-стержневій структурі. Автор обґруntовує, що ці ефекти доцільно використовувати в антенних системах з наперед заданими випромінювальними характеристиками.

**Четвертий розділ** присвячений практичній реалізації попередньо отриманих результатів, верифікації адекватності запропонованих і розроблених моделей та наданні оцінки підвищення ефективності випромінювання ребристо-стержневої структури. Для цього автором дисертаційної роботи розроблено експериментальний зразок ребристо-стержневої структури, в якій використано плазмовий розряд, та проведено ряд експериментів в безвідлунній камері науково-дослідницької лабораторії НДЛ-16 Національного університету «Львівська політехніка». Це дало змогу провести перевірку адекватності моделей на основі розрахунку середнього квадратичного відхилення та порівнянням діаграм спрямованості отриманих теоретично та експериментально.

Для оцінки підвищення ефективності випромінювання ребристо-стержневої структури обрано коефіцієнт спрямованої дії. Для цього проведено ряд експериментальних досліджень ребристо-стержневих структур, виконаних на основі металевого стержня та плазмового розряду, в результаті яких отримано серію діаграм спрямованості в площині поляризації вектора напруженості електричного поля та кросполяризованій площині. Заміна металевого стержня плазмовим розрядом та модуляція поверхневого імпедансу ребристо-стержневої структури металевими радіальними неоднорідностями підвищили показник ефективності за коефіцієнтом спрямованої дії на 3,592 дБ у поперечному напрямку відносно головної осі структури.

**Додатки** містять акт впровадження результатів дисертаційної роботи, перелік наукових праць автора за темою дисертаційної роботи, текст програми для автоматизованого розв'язку задачі аналізу ребристо-стержневої структури методом наведених ЕРС та конструктивні параметри експериментального зразка ребристо-стержневої структури.

### **3. Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі:**

1. Вперше запропоновано метод розрахунку ребристо-стержневої структури, який, на відміну від відомих, на основі використання методу А.Ф. Чапліна, призначеного для задач збудження модульованих імпедансних структур, модуляції поверхневого імпедансу металевими радіальними неоднорідностями та завдяки заміні металевого стержня плазмовим розрядом, дає змогу підвищити ефективність спрямованого випромінювання в площині вектора напруженості електричного поля.

2. Вперше запропоновано імітаційну модель ребристо-стержневої структури, яка, на відміну від відомих, використовує газорозрядну плазму з методикою розрахунку її параметрів за теорією Друде, що дало змогу дослідити випромінювальні властивості ребристо-стержневої структури в умовах наявності та відсутності плазми.

3. Удосконалено математичну модель для ребристо-стержневої структури зі скінченими, на відміну від відомих, розмірами, що дало змогу оцінити

характеристики випромінювання та дослідити вплив на них ширини та періоду металевих радіальних неоднорідностей, а також відбитої від кінця структури поверхневої електромагнітної хвилі у заданій смузі частот.

#### **4. Практичне значення результатів, отриманих в дисертаційній роботі:**

1. Удосконалено конструкцію ребристо-стержневої структури з коефіцієнтом поширення рівним 1,09 шляхом використання плазмового розряду, що дало змогу отримати поперечне випромінювання в площині вектора напруженості електричного поля та підвищити коефіцієнт спрямованої дії на 3,59 дБ, як основного параметра ефективності ребристо-стержневої структури.

2. На основі методу наведених електрорушійних сил удосконалено алгоритм розрахунку нормованої за амплітудою діаграми спрямованості в дальній зоні для ребристо-стержневої структури, який, на відміну від існуючих, дає змогу врахувати вплив коефіцієнтів поширення, відбиття та загасання біжучої хвилі на особливості формування розподілу напруженості електричного поля.

3. На основі розробленої імітаційної моделі ребристо-стержневої структури методом скінченних елементів встановлено, що використання 9 ітерації є достатнім для розрахунку електродинамічних параметрів в технології HFSS та отримано смугу робочих частот 12% за рівнем коефіцієнта стоячої хвилі  $< 2$  в частотному діапазоні 2..3 ГГц.

4. На базі відкритої інтерпретованої мови програмування «Python» розроблено програмний комплекс для автоматизованого отримання розподілу напруженості електричного поля ребристо-стержневої структури у вигляді нормованої за амплітудою діаграми спрямованості в дальній зоні.

5. Розроблено експериментальний зразок ребристо-стержневої структури з використанням плазмового розряду довжиною  $4\lambda_0$ , на основі якого підтверджено, що отримане значення амплітуди вектора напруженості електричного поля на 50% більше в напрямку, поперечному відносно головної осі досліджуваної структури, у порівнянні з результатом, отриманим в умовах відсутності плазми в цій структурі.

**5. Відповідність дисертації встановленим вимогам.** Дисертаційна робота Теплякова І. Ю. відповідає паспорту спеціальності 05.12.13 – радіотехнічні пристрой та засоби телекомуникацій, написана чіткою мовою, прийнятою у науково-технічній літературі. Автореферат достатньо повно розкриває зміст дисертації. Стиль викладу результатів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття, а велика кількість рисунків сприяє кращому розумінню матеріалів роботи. Оформлення дисертації та автореферату відповідають вимогам МОН України, що пред'являються до дисертаційних робіт.

**6. Повнота викладу результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях.** Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані та апробовані у 12 наукових працях, з них: 1 стаття у науковому періодичному виданні

іншої держави, 1 стаття у науковому фаховому виданні України, яке індексується міжнародною науково-метричною базою Scopus та 4 статті, що індексуються у НМБ Index Copernicus, з них дві написані одноосібно, праць у збірниках матеріалів і тез доповідей конференцій – 6 (з них 2 індексуються наукометричною базою Scopus).

В опублікованих працях у повному обсязі викладено основні положення дисертаційної роботи. Особистий внесок дисертанта в сумісних працях є підтвердженням. Рівень та кількість опублікованих праць відповідають вимогам, що висуваються до кандидатських дисертаційних робіт в Україні.

## **7. Зауваження до дисертаційної роботи**

1. На мій погляд у першому розділі доцільно було б у першу чергу надати загальну характеристику антенам поверхневих хвиль, оскільки саме вони пов'язані з тематикою та дослідженнями дисертаційної роботи, після чого провести огляд засобів інфокомунікаційних систем на базі поверхневих плазмонів.

2. Процес поширення та випромінювання поверхневої хвилі ребристо-стержневою структурою, який описаний та проаналізований у другому розділі, доцільно було б обґрунтувати теоретично на основі аналізу літературних джерел за цією тематикою.

3. Не зрозумілим залишається питання, яким чином визначено коефіцієнт відбиття під час розрахунку напруги живлення диполів в моделі ребристо-стержневої структури, отриманої на основі методу наведених електрорушійних сил.

4. Доцільно було б порівняти результати обчислення розподілу вектора напруженості електричного поля з використанням моделі ребристо-стержневої структури, розрахованої на основі методу наведених електрорушійних сил, та її вдосконаленої моделі. Результати такого дослідження виразити у числових значеннях та надати висновок: наскільки вдосконалено цю модель.

5. Недостатньо висвітлено питання залежності кількості диполів в моделі, розрахованої на основі методу наведених електрорушійних сил, на точність отриманих результатів, оскільки від кількості диполів в цій моделі залежить час розв'язку задачі аналізу ребристо-стержневої структури.

6. Запропонована імітаційна модель ребристо-стержневої структури, не враховує живлення, необхідного для отримання газорозрядної плазми в діелектричній трубці.

7. У третьому розділі доцільно було б привести результати розрахунку розподілу електричної складової електромагнітного поля на нормованих діаграмах спрямованості в однакові величини, наприклад, на рисках 3.5 та 3.11 розподіли вектора напруженості електричного поля наведено за напруженістю, проте на рисунку 3.13 показано діаграми спрямованості за потужністю.

8. На рисунку 3.7 є неточність. Зокрема, у тексті дисертаційної роботи згадується параметр «Maximum Delta S», а в підписі вісі ординат цього рисунка написано – «Max. Mag. Delta S».

Зроблені зауваження та недоліки є непринциповими та не зменшують цінності наукових положень, рекомендацій і висновків дисертаційної роботи, а також не знижують загального позитивного враження від поданої роботи.

### **8. Загальні висновки.**

Дисертаційна робота Теплякова Івана Юрійовича на тему «Підвищення ефективності ребристо-стержневої випромінювальної структури з використанням плазмового розряду» є завершеною науковою працею, в якій отримано нові наукові та практичні результати для вирішення актуального науково-практичного завдання розроблення методу підвищення ефективності випромінювання ребристо-стержневої структури шляхом використання плазмового розряду та зміни параметрів модуляції поверхневого імпедансу.

Дисертаційна робота за актуальністю, рівнем, обсягом, науковою новизною та практичною цінністю відповідає вимогам положення про «Порядок присудження наукових ступенів», затверженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 року, а її автор Тепляков Іван Юрійович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомуникацій.

Офіційний опонент  
доктор технічних наук, професор,  
перший проректор  
Національного авіаційного університету

Козловський В. В.

