

## **ВІДГУК**

офіційного опонента

**Чугая Олега Миколайовича**

на дисертаційну роботу **Бреславця Олексія Андрійовича**

«Наддобротні колювання в НВЧ резонансних структурах з металевими та діелектричними неоднорідностями», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія

### **Актуальність теми.**

Електроніка надвисоких частот (НВЧ) широко використовується в різних галузях техніки та областях медицини. Проте існує нагальна потреба в суттєвому покращенні технічних характеристик відповідних пристроїв. Науковим підґрунтям розв'язання цієї задачі є дослідження спектральних характеристик НВЧ резонансних структур різного типу, включаючи резонатори зі штучно створеними неоднорідностями та метаповерхні. Унікальні електродинамічні властивості таких структур визначають перспективність їхнього використання в НВЧ електроніці широкого спектру призначень, включаючи засоби дієлькометрії. Дисертаційна робота Бреславця О.А. присвячена дослідженню саме спектральних характеристик НВЧ резонансних структур, а також в метаповерхонь з випадково розміщеними діелектричними та металевими неоднорідностями.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.**

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, що викладені в дисертації Бреславця О.А., базується на інформованості про сучасний світовий рівень теоретичних знань і технічних розробок за тематики його дисертації, а також на комплексному підході до вивчення визначених об'єктів з використанням новітніх математичних та експериментальних методів дослідження з застосуванням сучасних технічних засобів.

### **Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність результатів математичного моделювання та

експериментального дослідження частотних характеристик резонансних структур різного типу та метаповерхонь підтверджується доповідями на міжнародних конференціях, публікаціями в провідних зарубіжних журналах та розробкою устаткування, за допомогою якого реалізуються запропоновані в дисертації методи дослідження зазначених структур.

**До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:**

1. Розраховано параметри відкритих сферичних резонаторів для визначення діелектричної проникності у широкому діапазоні значень (1-20) з надмалим тангенсом кута діелектричних втрат ( $5 \times 10^{-6}$ ) твердих зразків при оптимальних розмірах відкритого резонатора X-діапазону ( $TEM_{0,0,13}$ ); встановлено добре співпадіння результатів розрахунку й експериментального визначення резонансної частоти, добротності та мінімальних розмірів для L-діапазону ( $TEM_{0,0,11}$ ).
2. Для зразків твердих матеріалів отримано похибку вимірювання за допомогою відкритого резонатора X- та L-діапазонів для: діелектричної проникності – від 0.28% до 10%, тангенса кута діелектричних втрат – від 0.77% до 9%. Встановлено співпадіння результатів чисельного моделювання та фізичного експерименту. Зразок діелектрика, поміщеного в відкритий резонатор L-діапазону, повинен мати діаметр не менше, ніж 500 мм, що забезпечує високу напруженість електричного поля в зразку, стабільність резонансної частоти та добротності.
3. Розраховано параметри закритого циліндричного резонатора для визначення на робочій моді  $TM_{0,0,1}$  діелектричної проникності у широкому діапазоні значень (1-20) з надмалим тангенсом кута діелектричних втрат ( $5 \times 10^{-6}$ ) твердих зразків. Отримано добре співпадіння результатів розрахунку й експериментального вимірювання резонансної частоти та добротності. Різниця між результатами експерименту та розрахунків не перевищує 0.01-1.6%.
4. Для резонансних структур з довільною формою тіл обертання та з довільно розташованим сферичним включенням розраховано частотний спектр за допомогою методу граничних умов в локальних точках. Отримано добре співпадіння результатів розрахунку власних частот за допомогою запропонованої методики та за допомогою комп'ютерного моделювання методом кінцевих елементів. Методика

має продуктивність у 10 разів кращу порівняно з моделюванням при різниці зазначених результатів близько 0.6%.

5. Для закритого циліндричного резонатора, в якому стрижні розташовані асиметрично відносно центральної осі, розраховано та експериментально підтверджено наявність ознак хвильового хаосу (розподіл імовірності міжчастотних інтервалів наближається до розподілу Броді). Для випадку відсутності стрижнів або їхнього розташування симетрично відносно зазначеної осі симетрії підтверджено відсутність ознак хвильового хаосу (розподіл імовірності міжчастотних інтервалів наближається до розподілу Пуассона).

6. Реалізовано резонансну метал-діелектричну метаповерхню, яка характеризується високими значеннями затримки часу і наявністю п'яти смуг електромагнітної індукованої прозорості, що підтверджено математичним моделюванням.

### **Наукова новизна та практична значимість отриманих результатів.**

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше розроблено алгоритм вимірювання діелектричної проникності в широкому діапазоні її значень (1-20) та надмалого тангенса кута діелектричних втрат (до  $5 \times 10^{-6}$ ) твердого зразка кристалічного матеріалу у відкритому сферичному та закритому циліндричному резонаторах на основі передбачуваних калібрувальних характеристик резонансної частоти робочої моди й добротності резонатора. Показано, що алгоритм задовільняє вимогам до похибок вимірювання: 1) діелектричної проникності –  $\leq 10\%$ , 2) тангенса кута діелектричних втрат –  $\leq 20\%$ .

2. З використанням відомої методики граничних умов у локальних точках вперше розраховано резонансні частоти власних мод закритих діелектричних резонансних структур довільної форми тіл обертання і показано, що поля для граничних умов на зовнішній границі структури можна розраховувати на гладких поверхнях у меншій кількості окремих точок. Встановлено, що ця методика є більш зручнішою для вивчення міжмодової взаємодії. При цьому точність отриманих результатів становить 0,6%.

3. Вперше теоретично й експериментально показано, що в закритому циліндричному резонаторі у разі асиметричного розташування неоднорідностей відносно осі циліндра розподілення імовірності міжчастотних інтервалів

наближається до функції Вігнера завдяки нерегулярному характеру зсуву резонансних ліній частотного спектру.

4. Розроблена метал-діелектрична метаповерхня, в результаті моделювання якої виявлено параметри структури зі збільшеною кількістю смуг електромагнітної індукованої прозорості. Значення затримки часу в спектрі цих смуг набагато більші, ніж ті, що зазначені у вимогах до відомих пристроїв систем телекомунікацій.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Розроблений алгоритм на основі інтерполяції калібрувальних кривих, що забезпечує визначення діелектричної проникності та надмалого тангенса кута діелектричних втрат твердих діелектриків, може бути використано при проектуванні мікрохвильових пристроїв, наприклад, для оптимізації діаграми направленості антен.

2. Розроблена методика граничних умов у локальних точках, що забезпечує визначення частотного спектру в резонансних структурах у формі тіл обертання, може бути використана в засобах телекомунікації, зокрема, для оптимізації форми кривої вікна прозорості й ефективності зв'язку між резонаторами в каскадах частотних фільтрів.

3. Визначені умови появи хвильового хаосу в резонаторах з випадковими неоднорідностями можна використовувати у сферах бездротового зв'язку та локації, наприклад, для покращення співвідношення сигнал/шум й удосконалення адаптивних методів нелінійної обробки сигналів при виготовленні радарів і сонарів.

4. Розроблена метаповерхня може бути використана в засобах і елементах телекомунікації, наприклад, для покращення синхронізації сигнальних та інформаційних послідовностей імпульсів, співвідношення сигнал/шум, швидкості перемикання частоти в комутаторах і модуляторах.

### **Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.**

Результати досліджень було представлено та обговорено на 13 міжнародних конференціях і опубліковано в 4 статтях в спеціалізованих наукових журналах. Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації. Дисертаційна робота відповідає вимогам Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника.

## **Оцінка змісту дисертації.**

Дисертація Бреславця О.А. складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків та списку використаної літератури.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, показана її наукова і практична цінність, сформульовані мета і задачі дослідження, які необхідно вирішити для її досягнення, описано зв'язок дисертації з науковими планами та темами, приведена апробація дисертації і публікації.

В розділі 1 виконано огляд літератури та обґрунтування завдань дисертації.

В розділі 2 визначено схему компактного відкритого сферичного та закритого циліндричного НВЧ резонаторів для отримання спектральних характеристик, оптимальних при вимірюванні діелектричної проникності твердотільних зразків мінімальних розмірів у широкому діапазоні діелектричної проникності (від 1 до 20 одиниць) з надмалим тангенсом кута діелектричних втрат, а також у широкому діапазоні напруги електричного поля в центрі резонатора.

В розділі 3 виконано розрахунок власних частот закритих НВЧ аксіально-симетричних резонаторів зі сферичним діелектричним включенням методом граничних умов в окремих точках на границі розділу середовищ. Результат розрахунку підтверджено за допомогою методу збурення форми та методу сфероїдальної власної частоти.

В розділі 4 визначено вплив випадкових металевих штирових неоднорідностей на розподілення імовірності міжчастотних інтервалів частотного спектру закритого циліндричного НВЧ резонатора більярдного типу.

В розділі 5 розроблено резонансну метал-діелектричну метаповерхню для отримання високих значень затримки часу проходження електромагнітної хвилі та добутку групової затримки на пропускну здатність кількості смуг пропускання.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані чітко та відповідають змісту дисертації.

Список використаних джерел із 160-ти найменувань є повним, сучасним і включає переважно зарубіжні публікації світового рівня.

Анотація відображає основний зміст дисертації та в повній мірі розкриває

наукові результати та практичну цінність роботи.

### **Академічна доброчесність.**

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, в яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено.

Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно й містяться в опублікованих ним роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків дисертанта.

### **По дисертації можна зробити наступні зауваження:**

1. У другому розділі варто було вказати форму та інтервал розмірів зразків для вимірювання складових комплексної діелектричної проникності, діапазони значень тангенса кута діелектричних втрат та напруженості електричного поля.
2. В реченнях «Найбільшою перевагою і одночасно недоліком розглянутих відомих методів розрахунку власних частот резонансних структур в формі тіл обертання є можливість отримати рішення задачі знаходження спектру тільки для малих спотворень форми та малих неоднорідностей» (с. 36) та «Експериментальні навантажені добротності відкритого резонатора на резонансних частотах для повітря значно вищі за розрахункові, для зразка монокристалу сапфіру вони нижчі за розрахункові. Таким чином, розрахунок відповідає експерименту» с. 87 міститься протиріччя.
3. У роботі спостерігається низка стилістичних помилок та описок. Так, автором використано висловлювання: на с. 28 «Резонансними модами, які беруть участь у цих вимірюваннях діелектричної проникності», на с. 31 «Встановлено, що природа зсуву резонансних ліній складається з двох компонент», та інші.
4. Для деяких формул не вказані першоджерела.

Разом з тим, перелічені недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи. Дисертація є актуальною і має високу наукову цінність та практичну значущість.

## ВИСНОВОК

Вважаю, що за актуальністю, новизною, науковим рівнем та обсягом проведених досліджень дисертаційна робота Бреславця О. А. **«Наддобротні коливання в НВЧ резонансних структурах з металевими та діелектричними неоднорідностями»** в повній мірі відповідає вимогам Постанови Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», а її автор, Бреславець Олексій Андрійович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук,

професор кафедри фізики

Національного аерокосмічного університету

ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут"

МОН України

Олег ЧУГАЙ

Підпис Чугая О.М. засвідчую.

Вчений секретар Національного

аерокосмічного університету

ім. М.Є. Жуковського



Тетяна БОНДАРЄВА