

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента на дисертаційну роботу Бреславця Олексія Андрійовича
 «Наддобротні коливання в НВЧ резонансних структурах з металевими
 та діелектричними неоднорідностями»,
 на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за
 спеціальністю 104 – Фізика та астрономія

Актуальність теми дисертаційної роботи Бреславця О. А. обумовлена як практичним інтересом, так і важливістю з точки зору фундаментальних досліджень в галузі радіофізики та діелектрометрії. А саме, актуальність полягає в необхідності вивчення впливу неоднорідностей та спотворень форми резонансних структур, перспективних для **практичного** застосування, на їхні спектральні характеристики та встановлення основних механізмів, відповідальних за ці фізичні процеси.

Метою дисертаційної роботи є вивчення резонансних явищ в НВЧ структурах та в резонансних метаповерхнях з діелектричними та металевими неоднорідностями. Для досягнення мети було виконано наступні завдання: дослідження електромагнітних коливань в НВЧ резонаторах для задачі вимірювання діелектричної проникності твердотільних зразків у широкому діапазоні діелектричної проникності (від 1 до 20 одиниць) з надмалим тангенсом кута діелектричних втрат (до 5×10^{-6}); дослідження електромагнітних коливань в резонаторах в формі тіл обертання довільної форми; виявлення ознак явища хвильового хаосу на прикладі закритого циліндричного НВЧ резонатора з випадковими об'ємними неоднорідностями; дослідження поширення електромагнітних коливань в метал-діелектричній метаповерхні для визначення наявності електромагнітної індукованої прозорості. **Достовірність** отриманих у роботі експериментальних результатів підтверджується використанням апробованих методів і методик досліджень та відповідного сучасного експериментального обладнання, використанням калібрувальних зразків в експериментах, порівняльним аналізом з даними, отриманими науковими групами, а також публікаціями у рейтингових фахових міжнародних журналах, які входять до міжнародних наукометричних баз.

Структура дисертаційної роботи Бреславця О. А. складається з анотації, вступу, п'ятих розділів, висновків і списку використаних джерел. Результати дисертації викладено в 4 статтях, які опубліковано в реферованих періодичних фахових виданнях, та 13 тезах доповідей у збірниках праць міжнародних і вітчизняних конференцій.

В **першому розділі** виконано огляд літератури та обґрунтування завдань дисертації з загальних особливостей, переваг та недоліків НВЧ резонансних структур та резонансних метаповерхонь та напрямків їхнього практичного застосування з метою визначення завдань експериментальних досліджень цієї роботи. Визначено, що великий інтерес представляє задача вимірювання діелектричної проникності в максимально широкому діапазоні з надмалим тангенсом кута діелектричних втрат твердих діелектриків за допомогою об'ємних та відкритих резонаторів з максимально ефективно розрахованих та виготовлених частин цих резонаторів. Визначено, що основна необхідність розробок в області існуючих методів розрахунку власних частот резонансних структур в формі тіл обертання продиктована тим, що відомі рішення обмежено тільки малими відхиленнями від сферичної форми (еліпсоїди) та малими неоднорідностями. Визначено, що основними недоліками існуючих досліджень ознак наявності явища хвильового хаосу в закритих резонансних структурах є використання переважно 2-мірних теоретичних моделей та методик аналізу явища за допомогою променів.

Визначено, що при проектуванні метал-діелектричних метаповерхонь для задач отримання вікон електромагнітної індукованої прозорості виникають проблеми при переході на більш високі частоти, що пов'язано з необхідністю застосування підвищених вимог до точності виготовлення розмірів частин метаповерхні та втрати в металі, що збільшуються. Також виявлено обмеженість в досягнутих кількості смуг пропускання та значенні групової затримки.

В **другому розділі** дисертації визначено схему компактного відкритого сферичного та закритого циліндричного НВЧ резонатора для отримання спектральних характеристик оптимальних для вимірювання 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. Також визначено алгоритм вимірювання діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат.

У **третьому розділі** дисертації виконано розрахунок власних частот закритих НВЧ аксіально-симетричних резонаторів зі сферичним діелектричним включенням методом граничних умов в окремих точках на границі розділу середовищ, а його результат підтверджений за допомогою методів збурення форми та сфероїдальної власної частоти. Також проведені дослідження залежності точності від кількості мод, що беруть участь у розкладанні, залежності точності від кількості точок на границі розділу середовищ, впливу флуктуацій форми на спектр однорідного тіла, обчислювальної ефективності та стабільності.

У **четвертому розділі** дисертації визначено вплив випадкових металевих штирових неоднорідностей на розподілення імовірності міжчастотних інтервалів частотного спектру закритого циліндричного НВЧ резонатора більярдного типу.

У **п'ятому розділі** дисертації розроблено резонансну метал-діелектричну метаповерхню для отримання високих значень затримки часу проходження електромагнітної хвилі та добутку групової затримки на пропускну здатність, кількості смуг пропускання. Підтверджено можливість керування вікнами прозорості за допомогою геометричних параметрів.

Кожен розділ дисертаційної роботи має проміжні висновки. Основні результати дисертації наведено наприкінці дисертаційної роботи. Автором сформульовано та обґрунтовано висновки, узагальнення та положення всіх розділів дисертації. Таким чином, особистий внесок дисертанта є визначальним.

Варто відзначити **найбільш інтересні результати**:

- Розраховано параметри відкритих сферичних резонаторів для визначення діелектричної проникності у широкому діапазоні (1-20) з надмалим тангенсом кута діелектричних втрат (5×10^{-6}) твердих зразків при оптимальних розмірах відкритого резонатора Х- та мінімальних розмірах L-діапазонів. При цьому для резонатора Х-діапазону для моди $TEM_{0,0,13}$ знайдено гарне співвідношення для результатів розрахунку добротності і експериментального вимірювання добротності, а для резонатора L-діапазону для моди $TEM_{0,0,11}$ знайдено гарне співвідношення для результатів розрахунку добротності. Те саме було виконано для закритого циліндричного резонатора на робочій моді $TM_{0,0,1}$, а саме отримано гарне співпадіння результатів розрахунку добротності і експериментального вимірювання добротності.
- Вперше визначено алгоритм вимірювання діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат твердого зразка невідомого матеріалу в відкритому сферичному та

закритому циліндричному резонаторах на основі передбачуваних калібрувальних характеристик резонансної частоти робочої моди та добротності резонатора. Показано, що алгоритм задовільняє вимоги до похибок вимірювання: 1) діелектричної проникності – до 10%, 2) тангенса кута діелектричних втрат – до 20%.

- Розраховано частотний спектр в резонансних структурах з довільною формою тіл обертання з довільно розташованим сферичним включенням за допомогою методу граничних умов в локальних точках. Отримано гарне співпадіння результатів розрахунку власних частот за допомогою нашої методики та за допомогою комп'ютерного моделювання методом кінцевих елементів. Методика має продуктивність у 10 разів кращу порівняно з моделюванням при їх різниці 0.6%.
- В закритому циліндричному резонаторі, якщо стрижні розташовані асиметрично відносно центральної осі, розраховано та експериментально підтверджено наявність ознак хвильового хаосу (розподіл імовірності міжчастотних інтервалів наближається до розподілу Броді, що в границі є розподілом Вігнера). Якщо стрижні відсутні або розташовані симетрично відносно центральної осі симетрії, підтверджено відсутність ознак хвильового хаосу (розподіл імовірності міжчастотних інтервалів наближається до розподілу Пуассона).
- Реалізовано резонансну метал-діелектричну метаповерхню, в якій отримано високі значення затримки часу і 5 смуг електромагнітної індукованої прозорості, що підтверджено моделюванням.

Практичне значення отриманих результатів

1. Розроблений алгоритм на основі інтерполяції калібрувальних кривих, що має на меті визначення діелектричної проникності та надмалого тангенса кута діелектричних втрат твердих діелектриків, може бути використано при проєктуванні мікрохвильових пристроїв, наприклад, для оптимізації діаграми направленості антен. 2. Розроблена методика граничних умов у локальних точках для визначення частотного спектру в резонансних структурах у формі тіл обертання може бути використаною в засобах телекомунікації, наприклад, 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 може бути використано у сферах бездротового зв'язку та локалізації, наприклад, для покращення співвідношення сигнал/шум і удосконаленні адаптивних методів нелінійної обробки сигналів при виготовленні радарів і сонарів. 4. Розроблена метаповерхня може бути використаною в засобах і елементах телекомунікації, наприклад, для покращення синхронізації сигнальних та інформаційних послідовностей імпульсів, співвідношення сигнал/шум, швидкості перемикання частоти в комутаторах і модуляторах.

Зауваження до дисертації

- У другому розділі бажано б привести результати експериментальних досліджень для відкритого сферичного резонатора.
- У п'ятому розділі бажано б привести результати експериментальних досліджень для чисельно розрахованих метаповерхонь.
- У роботі спостерігається низка стилістичних помилок та описок.
- Занадто багато рисунків по відношенню до кількості тексту.

Вважаю, що вищенаведені недоліки не знижують наукову та практичну значущість викладених в роботі результатів дослідницької діяльності. Основним досягненням дисертанта є отримання, **вперше**, низки експериментальних результатів з дослідження умов

виникнення резонансних явищ при поширенні надвисокочастотних електромагнітних коливань через резонансні структури та резонансні метаповерхні з довільними неоднорідностями. Ці результати мають суттєву практичну значущість. Сформульовані на їх основі висновки є цілком **обґрунтованими**. Запропоновані в дисертаційній роботі методики експериментальних досліджень відповідають потрібному рівню достовірності.

Відомості про дотримання академічної доброчесності. Неправомірних запозичень та ознак порушення академічної доброчесності у дисертаційній роботі Бреславця О. А. не виявлено.

Вважаю, що дисертаційна робота Бреславця О.А. є **завершеною науковою працею**, в якій наведено повний опис наукового процесу починаючи з розробки та обґрунтування методик закінчуючи їхнім практичним використанням при проведенні досліджень. До безумовної переваги даної дисертаційної роботи варто віднести факт отримання фундаментальних експериментальних результатів, які мають наукову значущість для радіофізики та діелектрометрії. Результати, що було наведено в роботі пройшли успішну **апробацію** на міжнародних наукових конференціях як в Україні, так і за кордоном.

Узагальнюючи все вищевикладене, за актуальністю, новизною, науковим рівнем та обсягом проведених експериментальних досліджень дисертаційна робота Бреславця О. А. **«Наддобротні коливання в НВЧ резонансних структурах з металевими та діелектричними неоднорідностями»** повністю 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 рецензент:

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Відділу радіоспектроскопії
Інституту радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова НАН України



Олексій ГІРІЧ

*Підпис к.ф.-м.н., старшого
наукового співробітника
Відділу радіоспектроскопії
Григор'я О. О. завідувача
В.О. вченого секретаря
Інституту радіофізики та
електроніки ім. О.Я. Усикова
НАН України*




Кривенко О.В.