

## ВІДГУК

**офіційного опонента**  
**на дисертаційну роботу Рассохіної Юлії Валентинівни «Методи**  
**аналізу неоднорідностей у багат шарових планарних структурах»,**  
**подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних**  
**наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика**

**Актуальність теми дисертації.** Швидкий розвиток інтегрованих схем мікрохвильового діапазону, які дозволяють розробляти компактні конструкції з підвищеною надійністю та меншою собівартістю, забезпечує їм застосування у різноманітних комерційних та військових системах. При цьому процес інтегрування мікрохвильових схем передбачає розробку та використання широкого класу пасивних елементів та пристроїв, реалізованих за планарною технологією. На їх долю припадає значна частина як розміру, так і вартості виробу, що спонукає до пошуку нових рішень для реалізації пасивних компонентів та пристроїв, а також інтегрованих мікросхем на їх основі.

Один з можливих і ефективних шляхів побудови малогабаритних вузлів базується на використанні багат шарових структур з обробкою сигналу не тільки в горизонтальній, а і у вертикальній площині. Проте широке застосування такого підходу в процесі проектування мікрохвильових інтегрованих схем обмежується недостатнім розвитком методів розрахунку вузлів зі зв'язком між шарами, слабким вивченням їх особливостей. Тому дослідження багат шарових структур з виявленням нових якісних характеристик, підвищенням ефективності методів їх проектування, розширенням смуги робочих частот, вдосконаленням конструкцій на їх базі водночас з допустимістю технологічної реалізації залишаються важливими в напрямку розвитку мікрохвильової техніки.

Таким чином, тема дисертаційної роботи, за мету якої поставлено дослідження властивостей та вивчення характеристик розсіяння багат шарових планарних структур і неоднорідностей в планарних лініях передачі з подальшою розробкою на їх основі нових варіантів пасивних мікросмужкових пристроїв з покращеними характеристиками, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась в рамках пріоритетних напрямів науково-технічної діяльності Міністерства освіти і науки України, розвитку науки і техніки, позначених урядом України, в числі яких відмічено необхідність розробки нових апаратних рішень для перспективних засобів обчислювальної техніки, інформаційних та комунікаційних технологій. Дисертаційні дослідження безпосередньо пов'язані з науково-дослідними роботами, виконаними за участю претендентки в Донецькому національному університеті імені Василя Стуса у рамках держбюджетних тем: 2011–2012 роки – «Розробка високоефективних підсилювачів потужності на базі схем із маніпуляцією гармонік», номер держреєстрації 0111U000405, 2013–2014 роки «Розробка



просторово-розвинених схем підсилення та перетворення сигналів на базі високоефективних активних пристроїв» 0113U001534, 2015–2016 роки «Розробка високоефективних передавачів телекомунікаційної апаратури на базі підсилювачів з високим ККД за інтегральною технологією та енергоресурсозбереження при виробництві сталі в агрегаті ківш-піч» 0115U000089, 2017–2018 роки «Високоефективні вузли радіо-передавальних систем на базі підсилювачів та автогенераторів класів E та об'ємних інтегральних схемах» 0117U002363.

**Короткий аналіз змісту дисертаційної роботи.** Дисертація складається з анотації, переліку використаних скорочень, вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел. Основний текст містить 268 сторінок і включає 131 рисунок, 14 таблиць. Список використаних джерел містить 172 найменування на 20 сторінках.

У першому розділі проведено огляд основних методів аналізу неоднорідностей у планарних лініях передачі, виділено етапи їх розвитку, особливості та переваги, можливості подальшого удосконалення. Так, наприклад, відмічено, що прямі числові методи не дають чіткого уявлення стосовно хвильових процесів і взаємодії хвиль у складних планарних схемах, не дають інформації про розсіяння на неоднорідностях у них, в той час, як метод поперечного резонансу успішно використовується для аналізу розгалужень та окремих розподілених неоднорідностей.

Глибокий огляд публікацій у провідних наукових виданнях світу, присвячених розробці та дослідженню періодичних фільтруючих PBG-, EBG-, DGS-структур, а також мікрохвильових пристроїв (переходів, спрямованих відгалужувачів, спрямованих та диференційних фільтрів) на базі багатоплощинних неоднорідностей у багаточарових планарних структурах, дозволив сформулювати основні напрямки досліджень. Один з напрямків стосується розвитку строгих методів повнохвильового аналізу тривимірних планарних структур з можливістю вивчення хвильових процесів у них та їхніх характеристик розсіяння. Інший напрямок досліджень пов'язаний з можливістю створення нових компактних конструкцій пасивних пристроїв з малими втратами, а також схем для підсилювачів і автогенераторів з заданим вихідним імпедансом на робочій частоті та необхідним впливом на рівень вищих гармонік.

Вказано на проблему, яка розв'язується у дисертаційній роботі, та сформульовано основну мету роботи.

**Другий розділ** присвячений розробці методів розрахунку дисперсійних характеристик власних хвиль регулярних планарних мікросмужкової, щілинної та хвилеводно-щілинної ліній передачі. Вибір для дослідження саме цих ліній зумовлений їх переважним використанням при реалізації багаточарових планарних конструкцій, що підтверджують приведені у першому розділі результати огляду.

Для випадку екранованої мікросмужкової лінії розроблено алгоритм розрахунку сталої поширення і хвильового опору основної хвилі та частот відсічки хвиль вищого типу з використанням для крайової задачі апроксимації густини струмів на смужці рядами за базисом з ортогональних поліномів Чебишова.



Результати дослідження розробленого алгоритму дозволили сформулювати умову забезпечення його швидкої збіжності. Дослідження аналогічного алгоритму розрахунку дисперсійних характеристик основної і вищих типів хвиль виконано для екранованої мікросмужкової лінії на підвішеній підкладці.

Процедуру розв'язування крайової задачі, подібну до випадку лінії на підвішеній підкладці, розроблено для щілинної та хвилеводно-щілинної ліній. За прикладами розрахунку сталої поширення основної хвилі, її хвильового опору, частоти відсічки хвиль зроблено висновки стосовно збіжності алгоритмів та залежності точності обчислень від розмірів щілини і екрану. Також приведено результати розрахунку характеристик хвилеводно-щілинної лінії в залежності від ширини щілини. Практичне значення розробленого алгоритму підтверджено результатом проектування і оптимізації 5-ступінчастого переходу з прямокутного хвилеводу до хвилеводно-щілинної лінії.

Вперше запропоновано електродинамічну модель хвилеводно-щілинної лінії з закритим діодом у вигляді метало-діелектричної вставки. Розв'язок крайової задачі для цієї моделі дозволив здійснити розрахунок та оптимізацію схеми узгодження двох таких діодів з лінією.

**У третьому розділі** розглядається застосування методу поперечного резонансу для аналізу розподілених (які мають поздовжній розмір) неоднорідностей з поперечною симетрією у планарних лініях передачі, а також переходу між мікросмужковою та щілинною лініями. В процесі розвитку методу поперечного резонансу отримано прості вирази для розрахунку елементів матриці розсіяння симетричних неоднорідностей, а для їх реалізації запропоновано використовувати розрахунок спектрів власних частот резонаторів з неоднорідностями при різних умовах на границях.

Такий підхід застосовано до резонатора з неоднорідністю, утвореною мікросмужковою і щілинною лініями передачі, розміщеними ортогонально з двох сторін підкладки. Для розрахунку власних частот резонатора з врахуванням можливих видів взаємодії між лініями за методом Гальоркіна розроблено алгоритми розв'язку трьох крайових задач для трьох видів коливань в резонаторі з трьома різними граничними умовам у площинах симетрії.

Далі шляхом застосування умови поперечного резонансу отримано співвідношення для розрахунку елементів матриці розсіяння неоднорідності переходу між мікросмужковою і щілинною лініями. Вихідними даними служать результати розв'язків вказаних вище трьох крайових задач у вигляді п'яти пар значень розмірів резонатора (по кількості невідомих елементів матриці), які відповідають його власним частотам. Фазові сталі ліній, значення яких потрібні для розрахунку фазових множників, визначаються за алгоритмами, описаними у другому розділі.

На цінність запропонованого методу розрахунку переходу вказують приведені в роботі результати для схеми з двох мікросмужкових ліній, зв'язаних через щілинний резонатор, яка при своїй конструктивній простоті в той же час забезпечує фільтрацію синфазного сигналу, як завади.



**У четвертому розділі** для визначення параметрів неоднорідності, утвореної вузьким прямокутним щілинним резонатором у площині заземлення мікросмужкової лінії, відповідно до методу поперечного резонансу поставлено і розв'язано дві крайової задачі стосовно резонатора на базі такої структури з різними граничними умовами для двох типів стоячих хвиль. При цьому враховуються вищі поздовжні гармоніки поля на щілинному резонаторі та гармоніки густини струму в смужці. Розв'язки дають власні частоти об'ємного резонатора, залежні від його розмірів, на основі яких заведеною в розділі 3 методикою визначаються елементи матриці розсіяння самої неоднорідності.

Розрахунок параметрів розсіяння такого роду неоднорідностей застосовано для аналізу періодичних структур з щілинними резонаторами у площині заземлення мікросмужкової лінії. Дослідження амплітудних і фазових характеристик періодичних структур зі згрупованими щілинними резонаторами (1-, 2- і 3-ступеневі) здійснювалося шляхом розрахунків та експериментів, результати яких добре узгоджені між собою.

Для врахування взаємного зв'язку між розташованими близько щілинними резонаторами у площині заземлення запропоновано алгоритм розв'язування двох крайових задач з різними граничними умовами, аналогічний алгоритму для прямокутного щілинного резонатора. Розв'язок цих задач дає два значення резонансної довжини (відстані від неоднорідності до границі резонатора), за якими методом поперечного резонансу розраховуються елементи матриці розсіяння. Так само за методом поперечного резонансу з розв'язку крайової задачі розраховується матриця розсіяння неоднорідності, утвореної у площині заземлення двома зв'язаними між собою щілинними резонаторами різної довжини.

Результати розрахунку і експериментального дослідження періодичних структур з такими щілинними резонаторами підтвердили важливість врахування у їх площині вищих гармонік поля, оскільки завдяки ним появляються додаткові резонансні частоти чи смуги з високим рівнем загасання сигналу. Розроблені методи розрахунку цінні тим, що дають можливість на основі періодичних структур проектувати широкосмугові смуго-запірні фільтри і фільтри гармонік.

**У п'ятому розділі** розглядаються неоднорідності, утворені одиночним щілинним резонатором складної форми у площині заземлення мікросмужкової лінії, а також двома такими ж однаковими резонаторами з електромагнітним зв'язком між ними. В цьому випадку в крайових задачах по визначенню власних частот резонаторів, побудованих за методом поперечного резонансу, запропоновано для опису поля в щілинних резонаторах використовувати ряди за власними ТЕ- і ТН-хвилями хвилеводів складного перерізу, а для густини струму у смужковій лінії, як і у попередніх випадках, скористатися розкладанням у подвійні ряди за поліномами Чебишова та враховувати вищі поздовжні гармоніки.

Проведені для вказаних неоднорідностей розрахунки та порівняння з експериментом показали, що для врахування впливу взаємозв'язку між періодично розміщеними Н-подібними резонаторами, при якому виникають додаткові частоти



резонансної взаємодії смужкової лінії з розподіленою неоднорідністю, необхідно розв'язувати також крайову задачу зі змішаними граничними умовами.

Подібні дослідження виконано для періодичних структур з щілинними резонаторами П- та О-подібної форми, результати яких підтверджують правильність запропонованого підходу до розвитку методу поперечного резонансу та його ефективність.

**Шостий розділ** присвячений застосуванню методу поперечного резонансу до задач аналізу неоднорідностей у вигляді повороту щілинної лінії передачі під прямим кутом, а також стрибка ширини провідника мікросмужкової лінії. У першому випадку для розподілу поля на щілині запропоновано використовувати ряди за ортогональними векторними функціями власних ТЕ-хвиль L-хвилевода. При різній ширині щілин шукаються три розв'язки крайової задачі у вигляді власних хвиль резонатора з неоднорідністю, за якими далі згідно методу поперечного резонансу розраховуються елементи матриці розсіяння неоднорідності. Аналіз результатів розрахунків дозволив зробити ряд висновків стосовно властивостей повороту щілинної лінії.

У випадку східчастої неоднорідності індуктивного чи ємнісного типу для опису густину струму у неоднорідній (зі стрибками ширини) смужковій лінії на відміну від попередніх задач запропоновано використовувати двовимірні власні функції магнітного і електричного векторних потенціалів з розкладанням їх у ряди за ортогональними поліномами Чебишова у часткових областях. Розв'язки крайових задач на власні функції і власні значення цих векторних потенціалів при різних умовах на границях використовуються далі для крайових задач на власні частоти об'ємних резонаторів за методом поперечного резонансу, на основі чого розраховуються елементи матриці розсіяння розподіленої східчастої неоднорідності. Перевірка збіжності запропонованої процедури аналізу дозволила встановити обмеження на суми у рядах розкладу власних функцій векторних потенціалів.

**Сьомий розділ** присвячений розвитку методів аналізу розподілених неоднорідностей, розташованих у двох площинах тришарової структури. Для першої такої неоднорідності, утвореної поєднанням стрибка ширини мікросмужкової лінії з прямокутним щілинним резонатором у площині заземлення, розв'язок крайових задач базується, як і в попередньому розділі, на використанні для опису густину струму у неоднорідній лінії двовимірних власних функцій магнітного і електричного векторного потенціалів з розкладанням їх у ряди за ортогональними поліномами Чебишова. Компоненти електричного поля в щілинному резонаторі також записуються у вигляді подвійних рядів за ортогональними поліномами Чебишова 1-го та 2-го роду і поздовжніми гармоніками резонатора. Результати розрахунків показали, що запропонований алгоритм забезпечує достатньо швидку збіжність, а використання такої складної неоднорідності дозволяє отримати високий рівень загасання сигналу поза смугою пропускання, що має велике практичне значення.

Інші різновиди двоплощинних неоднорідностей, які також проаналізовані в цьому розділі, утворені поєднанням Н-подібного щілинного резонатора, а також гребінчастого щілинного резонатора, розміщених у площині заземлення, з



неоднорідністю індуктивного і ємнісного типу в нерегулярній мікросмужковій лінії. Розв'язування крайових задач для цих двоплощинних неоднорідностей здійснювалося з використанням базисних функцій хвилеводів складного перерізу, за якими розкладалося поле в щілинних резонаторах, а для розподілу густини струмів у лінії використано, як і в попередньому розділі, базис з ортогональних поліномів, що все разом забезпечило швидку збіжність розробленим алгоритмам.

Дослідження таких складних неоднорідностей вказало на існування додаткових, порівняно з одноплощинними неоднорідностями, резонансних частот з пропусканням сигналу в одній смузі та його загасанням в іншій (в широкій смузі у випадку гребінчастого резонатора), що тим самим дає можливість проектувати смугові пристрої з бажаними частотними характеристиками.

У всіх розглянутих випадках для зменшення часових затрат на розрахунки елементів матриці розсіяння запропоновано та використано апроксимацію спектрів власних частот резонаторів з неоднорідністю функцією з поліномами високого порядку у знаменнику.

У **восьмому розділі** розглядаються питання, пов'язані з застосуванням розроблених алгоритмів в процесі проектування мікрохвильових пристроїв. Для реалізації фільтру гармонік у вихідній ланці узгодження підсилювача потужності класу  $F^{-1}$  використано дві пари прямокутних щілинних резонаторів різних розмірів у площині заземлення, які розраховувалися за методом поперечного резонансу та були оптимізовані для забезпечення відповідних опорів навантаження на частотах другої і третьої гармонік робочої частоти. Досягнуті при цьому високі значення вихідної потужності та ККД підсилювача вказують на доцільність використання щілинних резонаторів при розробці високоефективних схем підсилення. Приклади проектування фільтрів з широкою смугою пропускання до 50% також підтверджують ефективність введення в їх структуру щілинних резонаторів.

Приведено результати дослідження багатошарової структури, утвореної Н-подібним щілинним резонатором у площині заземлення з поздовжнім відносно мікросмужкової лінії розташуванням щілини, яка з'єднує «гантелі» резонатора. За результатами досліджень встановлено, що така структура має властивості широкосмугового загороджувального фільтру завдяки двом частотам резонансної взаємодії щілин з основною лінією, і виявлено, зміною яких геометричних розмірів можна ефективно впливати на ширину смуги запирання, добиваючись в процесі проектування бажаних частотних характеристик.

**Новизна наукових положень, висновків та рекомендацій.** При вирішенні поставлених у роботі задач отримано ряд нових результатів, пов'язаних з дослідженням характеристик розсіяння на розподілених неоднорідностях планарних ліній передачі у багатошарових структурах.

До основних наукових результатів слід віднести:

1. Доведено доцільність використання рядів за базисом з ортогональних з вагою поліномів для крайових задач на власні хвилі у планарних лініях передачі на основі результатів розрахунків сталих поширення основної і вищих типів хвиль у екранованих мікросмужковій, мікросмужковій на підвішеній підкладці, щілинній та



хвилеводно-щілинній лінії за розробленими алгоритмами. На низці прикладів підтверджено ефективність цих алгоритмів та зроблено висновки стосовно їх збіжності. Вперше запропоновано електродинамічну модель та алгоритми розрахунку дисперсійних характеристик хвилеводно-щілинної лінії з металеводіелектричною вставкою, яка відіграє роль закритого діода, а також схеми узгодження з двома такими діодами у хвилеводно-щілинній лінії.

2. Отримано шляхом розвитку методу поперечного резонансу ряд нових аналітичних співвідношень для розрахунку елементів матриці розсіяння симетричних з поздовжніми розмірами неоднорідностей. Запропоновано використовувати у цих співвідношеннях результати розрахунку спектрів власних частот резонаторів з неоднорідностями при різних умовах на їх границях у вигляді електричної і магнітної стінок. Ефективність такого підходу підтверджено його застосуванням до неоднорідності, утвореної ортогональним перетином мікросмужкової і щілинної ліній, де для врахування можливих видів взаємодії між лініями розроблено алгоритми розв'язку трьох крайових задач для трьох видів коливань в резонаторі з різним граничними умовам у площинах симетрії.

3. Запропоновано алгоритм розв'язку крайової задачі для розрахунку за методом поперечного резонансу параметрів неоднорідності, утвореної вузьким прямокутним щілинним резонатором у площині заземлення мікросмужкової лінії, з врахуванням вищих поздовжніх гармонік поля в щілині та гармонік густини струму в смужці. Запропоновано також алгоритм розв'язку крайових задач для двох розташованих близько щілинних резонаторів з однаковою чи з різною довжиною, який дозволяє врахувати взаємний зв'язок між ними. Встановлено, що такий зв'язок відбувається за рахунок вищих гармонік поля у площині щілинних резонаторів і призводить до зсуву резонансних частот та до появи додаткових резонансів.

4. Запропоновано алгоритми розв'язку крайових задач для розрахунку за методом поперечного резонансу параметрів неоднорідностей, утворених одним чи двома зв'язаними щілинними резонаторами складної форми у площині заземлення мікросмужкової лінії. При цьому новим є те, що для опису поля в щілинних резонаторах запропоновано використовувати ряди за власними ТЕ- і ТН-хвилями хвилеводів складного перерізу, а для густини струму у смужковій лінії, як і у попередніх випадках, скористатися розкладанням у подвійні ряди за поліномами Чебишова та враховувати вищі поздовжні гармоніки. Встановлено, що взаємодія резонаторів спостерігається до відстаней, сумірних з їх поздовжнім розміром, і призводить до виникнення додаткової резонансної частоти.

5. Вперше використано метод поперечного резонансу для визначення неоднорідності прямокутного згину щілинної лінії передачі. При цьому розв'язувати крайову задачу запропоновано з поданням розподілу поля на щілині рядами за ортогональними векторними функціями власних ТЕ-хвиль L-подібного хвилеводу. За результатами розрахунків зроблено ряд нових висновків стосовно властивостей такої неоднорідності.

6. Вперше застосовано метод поперечного резонансу для розрахунку параметрів розсіяння східчастої неоднорідності індуктивного чи ємнісного типу у



мікросмужковій лінії передачі. Для опису густину струму у такій неоднорідній (зі стрибками ширини) лінії запропоновано двовимірні власні функції магнітного і електричного векторних потенціалів з розкладанням їх у ряди за ортогональними поліномами Чебишова та розроблено алгоритми розв'язку крайових задач на власні функції і власні значення цих векторних потенціалів, що далі використовується в крайових задачах на власті частоти резонаторів з неоднорідністю, і на основі чого визначаються характеристики розсіяння неоднорідностей.

7. Виявлено нові властивості тришарової структури, утвореної розташованими у двох її площинах розподіленими неоднорідностями, завдяки розрахункам, виконаним на базі розвиненого для таких випадків методу поперечного резонансу з використанням для розв'язування крайових задач векторних потенціалів густину струму в лінії, які розкладаються у ряди за ортогональними поліномами, і рядів за базисними функціями хвилеводів складного перерізу для опису поля в щілинних резонаторах та з використанням для зменшення часових затрат запропонованої апроксимації спектрів власних частот резонаторів функцією з поліномами високого порядку у знаменнику. Так встановлено, що неоднорідності, утворені поєднанням стрибка ширини мікросмужкової лінії з прямокутним щілинним резонатором дають високий рівень загасання сигналу поза смугою пропускання, а неоднорідності у складі Н-подібного щілинного резонатора чи гребінчастого щілинного резонатора і мікросмужкової лінії мають додаткові резонансні частоти з пропусканням сигналу в одній смузі та його загасанням в іншій.

8. Виявлено властивості широкосмугового загороджувального фільтру у багатошарової структури, утвореної Н-подібним щілинним резонатором в площині заземлення з розташуванням щілини, яка з'єднує боки - «гантелі» резонатора, вздовж мікросмужкової лінії, завдяки проведенням розрахункам за методом поперечного резонансу відповідно до розробленого алгоритму розв'язку крайової задачі. Запропоновано процедуру проектування таких фільтрів.

**Практична цінність отриманих результатів.** За результатами проведених теоретичних досліджень запропоновано методи аналізу розподілених неоднорідностей у багатошарових планарних структурах. Сукупність отриманих результатів дає можливість вивчати природу електромагнітних явищ та хвильових процесів у таких структурах, виявляти нові закономірності їх функціонування. Це дозволить розробляти на їх основі нові конструктивні рішення мікрохвильових фільтрів, ланок узгодження з заданими параметрами, з кращими властивостями та характеристиками для схем як пасивних, так і активних НВЧ пристроїв.

Підтвердженням сказаному є приведені в роботі результати реалізації фільтру гармонік у вихідній ланці узгодження підсилювача потужності класу  $F^{-1}$ , де використано дві пари прямокутних щілинних резонаторів різних розмірів, розрахованих за методом поперечного резонансу, що дозволило отримати високі значення вихідної потужності та коефіцієнту корисної дії підсилювача.

На основі багатошарових структур існує можливість проектування компактних пристроїв, які можуть виконувати задані функції у різних смугах частот, що підтверджують приклади проектування фільтрів з широкою смугою пропускання до



50% та з високим рівнем загасання поза смугою, досягнутими завдяки введенню в структуру фільтрів щільних резонаторів. На основі результатів проведених досліджень створено і запатентовано нові конструкції мікросмужкових фільтрів з покращеними характеристиками.

Використання на практиці отриманих в дисертації результатів створює додаткові можливості для розробників приймально-передавальної апаратури та засобів вимірювання, дозволить підвищити якість проектування нових перспективних радіотехнічних і телекомунікаційних систем мікрохвильового діапазону.

**Достовірність і обґрунтованість наукових результатів.** Достовірність і обґрунтованість наукових результатів, виводів і рекомендацій, отриманих в дисертаційній роботі, визначається: математичною строгістю проведеного аналізу; використанням апробованих методів теорії електромагнітного поля і числових методів при постановці електродинамічних задач; обґрунтованістю вибору базисних функцій, які використовуються в крайових задачах; поглибленим дослідженнями збіжності алгоритмів у залежності від порядку зрізання рядів; обґрунтованим вибором наближень; достатньою експериментальною перевіркою результатів теоретичних досліджень та їх близькістю до результатів вимірювань.

**Оцінка змісту дисертації.** Дисертація написана грамотно з використанням наукової термінології, оформлена акуратно і відповідно до вимог, встановлених МОН. Матеріал викладено у логічному порядку, містить коректні посилання на літературні джерела. Основні теоретичні положення підтверджуються результатами експериментів. Текст супроводжується необхідною кількістю таблиць і ілюстрацій.

**Оцінка ідентичності змісту автореферату і основних положень дисертації.** Автореферат дисертації оформлений згідно з існуючими вимогами до таких документів і його зміст адекватно і повною мірою відображає положення дисертаційної роботи.

**Повнота публікацій.** Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, а також описи розроблених пристроїв подано в 1-й монографії і в 1-му розділі монографії, у 21 статті у фахових виданнях і 1 статті в зарубіжному науковому журналі, з яких 8 статей включені до бази даних Scopus і 2 – до бази WoS, в 29 тезах та доповідях на міжнародних науково-технічних конференціях, в 3 патентах України на корисну модель.

**Апробація роботи.** Теоретичні і практичні результати роботи пройшли достатньо широку апробацію на 29 міжнародних науково-технічних конференціях в Україні і закордоном.

**Недоліки і зауваження.** Поряд із відзначеними досягненнями в дисертації є і недоліки. Основні з них такі:

1. У роботі практично не приводиться такий інформаційний матеріал стосовно запропонованих алгоритмів, як часові затрати на розрахунки спектрів власних частот, на розрахунки матриць розсіяння для одного значення частоти, і про скорочення часових затрат при зрізанні рядів.



2. Відсутнє роз'яснення, як вибираються розміри віртуального резонатора при визначенні за методом поперечного резонансу елементів матриці розсіяння у випадку, коли спектральні характеристики мають розщеплення на гілки.

3. З тексту стосовно крайової задачі для мікросмушкового резонатора із східчастою неоднорідністю не зрозуміло роль відстані до площини відліку (ref. plane)  $l_{2i}$  (рис. 6.7,а), оскільки для визначення параметрів розсіяння одна з довжин, наприклад,  $l_2$  розраховується за значенням довжини резонатора  $L$  і заданої другої довжини  $l_1$ .

4. Так само, з тексту стосовно тришарових структур з розподіленою неоднорідністю, яка складається з індуктивного відрізка мікросмушкової лінії та Н-подібного щілинного резонатора, не зрозуміло, як визначається відстань до площини відліку (ref. plane)  $l_{2i}$  (рис. 7.7, 7.11, 7.13), якщо задається тільки довжина  $l_1$ , а за розв'язком крайової задачі визначається тільки довжина резонатора  $L$ , а отже, не зрозуміло, до якої з довжин ( $l_2$  чи  $l_{2i}$ ) відносяться графіки спектрів власних частот (рис. 7.8, 7.9, 7.10, 7.12, 7.14).

5. Для такої поширеної структури, як східчаста індуктивна і ємнісна неоднорідності у мікросмушкській лінії, бажано було б порівняти параметри розсіяння, отримані запропонованим методом, з результатами розрахунку у середовищі відомих комерційних пакетів програм аналогічної неоднорідності, утвореної з'єднанням двох ступінчастих переходів відрізком мікросмушкової лінії.

6. Зауваження, які стосуються приведених у тексті рисунків:

- а) на рис. 2.18 відсутня часткова область 3, а на рис. 2.19 приведено характеристики внесених втрат ( $S_{21}$ ), хоч подаються, як втрати на відбиття;
- б) на рис. 4.5,б та 4.20 для довжини резонатора використано позначення  $L_s$ , яке не зустрічається в основному тексті.

7. У деяких місцях зустрічається використання невдалих виразів, наприклад, «...мікросмушковий ЕВГ-фільтр, навантажений на щілинні резонатори спіральної форми.» ст.39, «Геометрія «слотованої» мікросмушкової лінії полегшує компенсацію фазової швидкості, що покращує...» ст.48, «...відгалужувач має фракційну смугу частот з коефіцієнтом зв'язку  $52\% \pm 1$  дБ...» ст.48, «... побудуємо ABCD-матрицю фільтра як добуток послідовно включених відрізків лінії передачі,...» ст.222. Крім того, мають місце питання до термінології, наприклад, використано терміни «смуго-запіральний», «хвилевідно-щілинна», «частота відсічення», «затухання», в той час, як доцільно вживати «смуго-запірний», «хвилеводно-щілинна», «частота відсікання (відсіку)», «загасання».

Вказані зауваження не є визначними і не знижують загальний рівень проведених досліджень.

**Загальний висновок.** Дисертація відповідає паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика, за яким її подано до захисту. Дисертація є закінченою науковою роботою, присвячена одній темі, в якій отримано нові наукові і практичні результати, що в сукупності вирішують актуальну і важливу наукову проблему розробки теорії та удосконалення методів аналізу розподілених (з поздовжніми



розмірами) неоднорідностей у лініях передачі планарного типу, розташованих у багаточарових планарних структурах мікрохвильового діапазону частот. Вважаю, що дисертаційна робота по своїй актуальності, новизні, практичній цінності і достовірності отриманих результатів повністю відповідає вимогам п. 10 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567, а її автор, Рассохіна Юлія Валентинівна, заслуговує на присвоєння вченого ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент  
д.т.н. доцент, завідувач кафедри  
радіоелектронних пристроїв та  
систем Національного університету  
«Львівська політехніка»



Оборжицький В.І.

Підпис доц.. Оборжицького В.І. засвідчую

вчений секретар Національного  
університету «Львівська політехніка»




Брилинський Р. Б.