

ВІДГУК

офіційного опонента доктора фізико-математичних наук, доцента,
провідного наукового співробітника кафедри теоретичної радіофізики
Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна
Туза Володимира Ростиславовича на дисертаційну роботу Острижного
Євгенія Михайловича «Електродинамічні властивості кіральних об'єктів зі
штучною оптичною активністю в мікрохвильовому діапазоні», подану на
здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань
10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – фізика та астрономія

Актуальність дослідження. Обертачі площини поляризації виконують важливу функцію в системах передачі електромагнітних хвиль, особливо на високих частотах. Їх основне призначення пов'язане з керуванням станом поляризації електромагнітної хвилі, що проходить через хвилевідну систему. Зокрема, обертачі дозволяють гнучко налаштовувати системи хвилеводів на роботу з різними типами поляризації та виконувати перетворення поляризаційного стану за потреби. Це особливо важливо в багатоканальних хвилевідних системах та антенах, де потрібно мати можливість робити перемикання між різними поляризаційними станами залежно від умови поширення сигналу. Контроль поляризаційних станів у хвилевідних системах безпосередньо пов'язаний із ефектом штучної оптичної активності (кіральності), що проявляють поляризаційні обертачі.

У роботі розглянуто різноманітні конструкції обертачів площини поляризації (кіральних діафрагм), що розташовані в круглому хвилеводі. Особливу увагу приділено конструкціям, що мають дієдричну симетрію (група симетрій правильного многокутника). На сьогоднішній день, зв'язок між зазначеною симетрією та проявом кіральності у хвилевідних діафрагмах вивчено недостатньо. Дослідження явищ оптичної активності у хвилевідних системах потребують розвитку адекватних фізико-математичних моделей, відповідного програмного забезпечення для числового моделювання та послідовної експериментальної верифікації отриманих теоретичних моделей. З цієї причини проведене теоретичне, числове та експериментальне вивчення властивостей штучно створених кіральних хвилевідних структур, дослідження впливу топології дієдричних хвилевідних неоднорідностей на прояв кіральності дає можливість отримати сукупність уявлень про електромагнітні явища в таких структурах, що і обумовлює **актуальність досліджень**, виконаних у дисертаційній роботі.

Актуальність досліджень також підтверджується і характером значного числа державних наукових програм, в межах яких виконувалась дисертаційна робота у відділі радіоспектроскопії Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України (ІРЕ НАНУ). Робота також виконувалась у межах проєкту, фінансованого за договором із центральним органом виконавчої влади та Національною академією наук України.

Ступінь наукової обґрунтованості та наукова новизна результатів роботи. Достовірність отриманих результатів підтверджується вибором адекватних фізико-математичних моделей, строгою постановкою задач, використанням математично та фізично обґрунтованих методів розв'язання задач, що розглядаються, та співставлення результатів, одержаних різними методами та експериментальною верифікацією. Зокрема, обчислювальні розрахунки проведено на програмному забезпеченні, розробленому у відділі (зараз лабораторії) обчислювальної електродинаміки ІРЕ НАНУ, яке ґрунтується на методах часткових областей і узагальнених матриць розсіяння. Цей пакет практично підтвердив свою коректність і вже дозволив розробити значну кількість пристроїв хвилевідної та антенної техніки, що знайшли практичне застосування, зокрема, на радіотелескопі у м. Золочів. Додатково результати підтверджені порівнянням з розрахунками, виконаними у комерційних програмних пакетах з електродинамічного моделювання CST Microwave Studio та HFSS. Проведені експериментальні дослідження, що виконані на базі відділу радіоспектроскопії ІРЕ НАНУ з використанням спеціально виготовлених хвилевідних діафрагм показало гарне узгодження отриманих теоретичних та експериментальних результатів.

Наукова новизна результатів роботи полягає у виявленні та дослідженні низки нових фізичних ефектів і закономірностей у поширенні електромагнітних хвиль у хвилеводах навантажених кіральними діафрагмами. Знайдені фізичні ефекти пояснюються шляхом аналізу власних коливань хвилевідної системи. Відповідність спектральних резонансів у коефіцієнтах проходження/відбиття, що виявлені шляхом числового моделювання та вимірювання експериментальних зразків до власних частотот хвилевідної системи додатково підтверджує достовірність проведеного дослідження та отриманих результатів.

До важливих нових результатів, що отримані у дисертаційній роботі можна віднести наступне:

1. Виявлено 90-градусний фазовий зсув між коефіцієнтами відбиття і проходження крізь хвилевідний вузол (систему діафрагм) з дієдричною симетрією. Незважаючи на те, що цей результат не доведено теоретично і було отримано з аналізу числових розрахунків, висока точність цього зсуву не залишає сумнів щодо правильності теоретичного висновку. З цього результату випливає, що об'єкти з дієдричною симетрією є симетричними двопортовими пристроями так само, як і об'єкти з позовжньою симетрією. Тому до них справедливі усі висновки щодо характеру спектральних характеристик залежно від наявних власних коливань.

2. Показано, що резонансі частоти і добротність резонансів пари спряжених діафрагм з одним кільцем прямокутних щілин істотно залежать від кількості щілин. Чим більше щілин, тим нижче резонансні частоти і тим більша добротність резонансів. Отриманий результат дає загальне уявлення про ступінь електродинамічного зв'язку у системі хвилевідних діафрагм, що проявляють оптичну активність (кіральність).

3. Отримання багаторезонансного ефекту штучної оптичної активності при розташуванні щілин в декількох кільцях спряжених діафрагм. Отриманий ефект має практичну значущість при створенні і використанні багатоканальних хвилевідних систем.

4. Запропоновані компактні конструкції обертачів у круглому хвилеводі, що можуть переналаштовуватись. Найбільш компактний дизайн має загальний поздовжній розмір, який у 30 разів менший за довжину хвилі.

Структура і зміст дисертації. Результати дисертаційної роботи повністю викладено у 12 публікаціях: 4 наукові статті, з яких 3 індексується в міжнародних наукометричних базах даних Scopus та/або Web of Science, а одну статтю опубліковано у фаховому науковому виданні України, 8 тез міжнародних наукових конференцій.

Дисертація містить анотацію, вступ, п'ять розділів, висновки, перелік використаних джерел та перелік публікацій автора.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету та задачі роботи, наведено стислу характеристику результатів, ступінь їх апробації та перелік публікацій.

У *першому розділі* наведено огляд стану справ у дослідженнях електромагнітних хвиль у штучно створених середовищах (метаматеріалах), властивості яких обумовлені не стільки властивостями матеріалів елементів, що їх складають, скільки їх штучно створеною формою (геометрією) та впорядкуванням. Описано методи електродинамічного моделювання, що використовуються для розрахунків метаматеріалів. Особливу увагу приділено дослідженням штучних оптично-активних (кіральних) середовищ та поляризаторів на їх основі, а також власним коливанням плоско-кіральних об'єктів. Визначено, які саме особливості топології спричиняють виникнення явища кіральності. У результаті сформована мета роботи, яка полягає у виявленні нових фізичних ефектів і закономірностей при взаємодії електромагнітних полів зі структурами (діафрагмами), що мають дієдричну симетрію, проявляють кіральність та розташовані у хвилевідних системах (круглий хвилевід). Сформульовано задачу, розв'язок якої наведено в наступних чотирьох розділах.

Другий розділ дисертації присвячено дослідженню компактних обертачів площини поляризації в круглому хвилеводі. Такі обертачі є двошаровими об'єктами (подвійні чотири-щілинні діафрагми). Явище кіральності, яке вивчається, виникає за рахунок взаємодії по швидко згасаючим модам у зазорі між двома діафрагмами. Розглянуто кілька варіантів сполучення діафрагм, які доводять, що найкращі властивості спостерігаються у випадку спряженого розташування. Проведено порівняння властивостей обертачів площини поляризації з різною симетрією. При цьому критеріями для порівняння були діапазони кутів повороту площини поляризації, можливість забезпечення гарного узгодження, а також здатність обертачів до налаштування шляхом взаємного повороту елементів двошарового плоско-кірального вузла. Властивості системи виявляються шляхом повнохвильового числового обчислення за допомогою програмного

пакета на основі метода узгодження мод, розробленого в IPE НАНУ. Результати розрахунків верифікуються шляхом їх порівняння з результатами отриманими комерційним програмним забезпеченням (CST Microwave Studio) та експериментальними вимірюваннями. Отримані результати дозволили вибрати об'єкти з дієдричною симетрією, що демонструють найкращі показники із обертання площини поляризації в круглому хвилеводі.

У *третьому розділі* автор фокусується на детальному дослідженні обертачів саме з дієдричною симетрією. Вивчається вплив топології окремих компонентів кірального двошарового об'єкта, що складається з пари спряжених діафрагм з прямокутними щілинами у круглому хвилеводі, на його резонансні частоти, добротність резонансів та здатність обертати площину поляризації. Вивчено вплив геометричних параметрів обертача на кількість і значення резонансних частот. Дослідження є узагальнюючим для компактних поляризаційних обертачів на основі щілинних діафрагм або гофрованих фланців і дозволяє вивчати системи з дієдричною симетрією з довільним порядком у двошарових періодичних ґратках. Проведена аналітична апроксимація частотної характеристики дієдричного двошару. Вона полягає у використанні аналітичних виразів для розрахунку коефіцієнтів відбиття та пропускання для симетричного двопортовика через набір його власних частот та унітарності його S -матриці (аналітичні вирази були отримані раніше іншими авторами). Показано, що такий аналітичний метод може бути застосований для моделювання спряженої структури, запропонованої у дисертації, та визначено межі його використання. Досліджено явище багатосмугової оптичної активності у двошарових об'єктах, та встановлено факт збільшення кількості можливих резонансів у частотній характеристиці при додаванні нового кільця щілин до одиночних компонентів двошарової діафрагми. Отримані у цьому розділі теоретичні результати підтверджені експериментальними вимірюваннями, проведеними для пари спряжених діафрагм з різною кількістю прямокутних щілин.

У *четвертому розділі* запропоновано оригінальну конструкцію обертача площини поляризації в круглому хвилеводі, утворену двома з'єднаними гофрованими фланцями. Такі обертачі площини поляризації, розташовані поза об'ємом лінії передачі. Їх робота ґрунтується на збудженні особливих («дієдричних») власних коливань у хвилевідному об'єкті, який утворюється двома гофрованими фланцями з обертальною симетрією. Показано, що вибрана топологія забезпечує 3D-кіральність об'єкта при азимутальному зсуві фланців і повороті площини поляризації на довільний кут у смузі в кілька відсотків з мінімальними зворотними втратами. Для демонстрації роботи однієї із запропонованих конструкцій обертачів, з елементами, розташованими поза межами лінії передачі, була виготовлена та експериментально досліджена спеціальна комірка та пара гофрованих фланців.

П'ятий розділ присвячено методиці проведення експериментальних досліджень, здійснених при виконанні дисертаційної роботи. Описані методи виготовлення діафрагм та спосіб їх розташування в хвилеводі. Наведено

таблицю порівняння методів використаних у дисертаційній роботі для виготовлення зразків. Продемонстровані недоліки класичного експерименту та запропоновані методи їх усунення для досягнення більш точних результатів. Також викладена загальна методика проведення експерименту для вимірювання коефіцієнту відбиття та проходження крос-поляризованої хвилі.

Практичне значення наукових результатів, отриманих у дисертаційній роботі Острижного Є. М. полягає у конкретних запропонованих конструкціях компактних обертачів площини поляризації.

Обертачі площини поляризації відіграють важливу роль в тому числі в оборонній тематиці через їх здатність покращувати якість і надійність передачі інформації в критично важливих військових системах, таких як радары, системи зв'язку та системи управління озброєнням.

Важливо відзначити перспективи подальшого розвитку напрямку досліджень з переходом на перфоровані двошарові екрани з дієдричною симетрією елементарних комірок. Налаштування поляризації сигналів, що проходять через такі системи, може дозволити знизити вразливість до впливів засобами радіоелектронної боротьби (РЕБ). Наприклад, правильне керування поляризацією може зменшити ймовірність того, що противник зможе подавити сигнал або ускладнити виявлення цілей за допомогою ворожих систем РЕБ.

Відомості про дотримання академічної доброчесності. У дисертаційній роботі та публікаціях Острижного Є. М. неправомірних запозичень та ознак порушення академічної доброчесності не виявлено.

Зауваження до дисертації не мають принципового характеру, але мають бути зазначені у наступному:

1. У розділі 2, на рисунку 2.1 діафрагми вводяться у розгляд у порядку пара подвійно-дзеркальних симетричних діафрагм (DM), спряжена пара плоско-кіральних діафрагм (CCh), і спарена пара плоско-кіральних діафрагм (TCh). Далі у тексті порядок змінюється: спочатку розглядаються діафрагми DM і TCh через подібність їх властивостей, а тоді CCh. У таблиці 2.2. на сторінці 54 де наведено порівняння обертачів різних топологій порядок також змінено. Зміна порядку в описі діафрагм утруднює сприйняття тексту, також, зокрема, через велику кількість скорочень, що використовуються.

2. У розділі 2, на сторінці 55 слід відмітити невдале позначення елементів матриці розсіювання (див., наприклад, рівняння (2.2)), де верхні індекси визначають вихідні та вхідні фізичні порти, а нижні індекси позначають номери мод, тоді як у літературі зазвичай вихідні та вхідні фізичні порти позначаються нижніми індексами. У розділі 3, на сторінці 77, у формулі (3.3), індекси використано у традиційному вигляді.

3. У розділі 2, отримані результати числового моделювання порівнюються з експериментальними даними. При цьому, моделювання системи з реальними омичними втратами не проведено, що призводить до розбіжностей у результатах отриманих з числового моделювання та

експериментального дослідження. Розглянуті обертачі працюють на високодобротних власних коливаннях, які мають як втрати на випромінювання, так і омичні втрати в металі внаслідок сильних полів у зазорі між діафрагмами. Тому є сенс оцінити втрати, що вносяться обертачем у повну хвилевідну систему також і у числовому моделюванні.

4. У розділі 3, на сторінці 75 власні коливання визначаються як умовно симетричні або антисиметричні залежно від близькості їх полів до тих, чий тип симетрії відомо наперед. Більш традиційне визначення типів зв'язаних коливань пов'язано з фазовим розподіленням поля на компонентах системи (першій та другій діафрагмах). У такому випадку, зв'язані коливання, що осцилюють у протифазі (антисиметричні коливання) мають меншу енергію зв'язку і відповідно більш низьку частоту.

5. У розділі 4, на сторінці 94, автор визначає хвилевідний вузол, утворений двома близько розташованими гофрованими металевими фланцями в круглому хвилеводі як «композитний» об'єкт. Таке визначення не є досить вдалим, так як термін «композитний» зазвичай відноситься до об'єктів виконаних із різних матеріалів.

6. У розділі 5 не вказана точність виготовлення зразків.

7. Більшість числових результатів у дисертаційній роботі отримані з використанням програмного забезпечення, розробленого у ІРЕ НАНУ, яке ґрунтується на методах часткових областей і узагальнених матриць розсіяння. Було б доцільно привести дані про метод, інформацію про програмну реалізацію, точність розрахунків принаймні у додатках.

8. Автор недостатньо уважно віднісся до перевірки грамотності тексту дисертації. У роботі є низка невірно вжитих українських слів. Наприклад, невірно вживається відмінювання слова «хвилевід» (навіть у змісті), в деяких містах замість слова «щілини» вжито «шілини» (стор. 84-86). В україномовній літературі вживається термін «дієдричні» замість «дієдральні».

В цілому ж наведені зауваження не знижують якості роботи і не торкаються її принципових положень і висновків. В ній проведений детальний аналіз нових явищ і одержані важливі фізичні теоретичні результати, які з успіхом знайдуть застосування на практиці.

Висновок щодо відповідності дисертації нормам. Вважаю, що дисертаційна робота Острижного Є. М. «Електродинамічні властивості кіральних об'єктів зі штучною оптичною активністю в мікрохвильовому діапазоні» є завершеною науковою працею, яка містить низку нових, актуальних і достовірних результатів, що свідчить про її складність, систематичність та важливе значення для розробки компактних обертачів поляризації. Дисертація повністю відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня

2022 р., а її автор, Острижний Євгеній Михайлович, заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та Астрономія».

Опонент
доктор фіз.-мат. наук, доцент,
провідний науковий співробітник
кафедри теоретичної радіофізики
Харківського національного університету
імені В.Н. Каразіна
Володимир ТУЗ

