

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Каліберди Мстислава Євгеновича
«Чисельно-аналітичні методи в теорії дифракції хвиль на плоских екранах»,
подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора
фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика

Актуальність теми. Системи плоских екранів або отворів в них є важливими елементами різноманітної радіофізичної апаратури, такими як антени, сенсори, фільтри, поглиначі та інше. Крім того, що такі структури мають широке практичне використання, вони також є відмінною базою і полігоном для розвитку та апробації методів розв'язання відповідних мішаних крайових задач електродинаміки. Очевидно, що набір відомих методів розв'язання задач дифракції на елементарних плоских розсіювачах, таких як півплощина, смужка, періодична решітка, диск – становлять «золотий» фонд дифракційної теорії. Проте питання пов'язані з вивченням взаємодії електромагнітних хвиль із структурами, які складаються з сукупності плоских елементарних розсіювачів, у багатьох випадках є відкритим. Наприклад, у випадках, коли необхідне коректне врахування хвилевідних та резонансних ефектів у широкому частотному діапазоні, зокрема за наявності кусково-однорідних діелектричних середовищ або за наявності суттєво різнорозмірних елементів, а також у випадках комбінацій прямокутних і круглих елементів. Слід також відзначити, що у багатьох випадках при роботі з такими системами, мова іде про пошук нових властивостей, що потребує багатократного розв'язування дифракційних задач. Це, у свою чергу, створює проблему, пов'язану з обмеженням комп'ютерного часу досліджень. Власне вектор дисертаційного дослідження спрямований на розвиток спеціалізованого підходу для розв'язання цих проблем. Він полягає у розробленні та розвитку відповідних математичних методів і вивчені, на цій основі, фізичних закономірностей взаємодії електромагнітних полів з плоско-структурними моделями робочих елементів радіофізичних пристроїв. Розв'язання цих задач є актуальним для вирішення практичних проблем проектування та оптимізації електромагнітних систем, зокрема, в контексті стрімкого розвитку технологій в НВЧ та ТГц діапазонів. Такі дослідження та відповідні методи можуть мати практичне значення для розроблення нових технологій зв'язку, радарних систем, антен та інших електронних пристроїв.

В основу дисертаційної роботи покладено метод сингулярних інтегральних рівнянь і метод операторних рівнянь, які розвиваються і адаптуються до розв'язання дифракційних задач на складних плоских структурах. Ключовим моментом є подання розсіювача у вигляді об'єднання його окремих елементів, що дозволяє застосовувати уніфіковану процедуру запису рівнянь для усієї досліджуваної структури, використовувати відомі або отримані розв'язки для кожної з виділених неоднорідностей. Такий підхід дозволяє автору зменшити розмірність матриці результуючої системи рівнянь і, відповідно, скоротити комп'ютерний час розв'язання задачі дифракції. У дисертації автор запропонував методологію ефективного дослідження як структур складених з ідеально-провідних розсіювачів, так і імпедансних, що робить її достатньо універсальною.

У дисертаційному дослідженні автор фокусує свою увагу на вивченні розсіювальних властивостей різного типу плоских дифракційних решіток, які можуть

бути скінченними, нескінченними або напів-нескінченними. В таких структурах, окрім дискретного, появляється також неперервний спектр. У зв'язку з цим, суттєва увага у дисертаційній роботі приділяється розробленню відповідних методів аналізу таких розсіювачів. У досліджуваних задачах ядра операторів розсіяння допускають особливості типу полюса на дійсній осі, викликаючи складність у їх розв'язанні. Для врахування їх впливу та покращення обчислювальної стійкості автором запропонована процедура регуляризації. Це, власне, і дозволило розширити область застосування методів дослідження на напівнескінченні решітки та решітки з порушенням періодичності елементів, що є важливим для практичних застосувань. Далі розроблений підхід було розширено на системи, де розсіяні поля представлені суперпозицією хвиль трьох типів: плоских, циліндричних і сферичних. Це створило можливість вивчення електродинамічних характеристик різноманітних структур за допомогою уніфікованої процедури запису рівнянь.

Важливе місце у дисертаційній роботі займає дослідження розсіюючих властивостей сучасних графенових структур, які, завдяки своїм електрофізичним, механічним та оптичним властивостям, є перспективними для розроблення нових технологій у приладобудуванні. У дисертації проводиться дослідження електродинамічних властивостей графенових решіток. Встановлено значення параметрів, при яких спостерігається виникнення плазмонних резонансів, положенням яких можна керувати динамічно, а також цілої низки резонансів іншої фізичної природи. Розсіювальні властивості графенових решіток у вакуумі автор отримав з розв'язку сингулярних інтегральних рівнянь. Показано також, що задачі дифракції на скінченних решітках у діелектричному хвилеводі приводить до появи полюсів у ядрах інтегральних рівнянь Варто відмітити, що вигляд сингулярних інтегральних рівнянь залишається незмінним для цілої низки розглянутих у дисертації структур. Це дозволяє застосовувати уніфіковану процедуру їх дискретизації.

Актуальність і значимість даної роботи також підтверджується тим, що її матеріали є складовими частинами 13 держбюджетних науково-дослідних робіт, які виконувались під керівництвом та за участю Каліберди М.Є.

Наукова новизна результатів, отриманих у роботі, полягає у наступному.

В дисертаційній роботі розв'язано важливу наукову проблему, пов'язану з розкриттям природи фізичних ефектів та закономірностей, які виникають при взаємодії електромагнітних та акустичних хвиль з багатоелементними багатошаровими системами плоских екранів. Ці системи відрізняються як геометрією розсіювачів, так і матеріальними параметрами елементів. Розробка математичного апарату і застосування обґрунтованих строгих методів дозволило провести дослідження їх електродинамічних властивостей, запропонувати ефективні методи керування характеристиками розсіяних полів як шляхом перебудови геометрії, так і динамічно, а також провести оптимізацію параметрів.

Дисертантом, на базі строгих математично обґрунтованих методів, проведено дослідження впливу краю нескінченних стрічкових решіток типу жалюзі на електромагнітне поле. Розглянуто також розсіяння плоских хвиль на плоскій напівнескінченній періодичній решітці та досліджено електромагнітний взаємозв'язок напівнескінченної та скінченної решіток. Автором отримано наближений розв'язок задачі дифракції власної хвилі діелектричного хвилеводу на напівнескінченній періодичній решітці.

Дисертантом розвинуто теорію дифракції електромагнітних хвиль на решітках з дефектами у періодичності розміщення елементів. Встановлено також дифракційний взаємозв'язок ідеальних та імпедансних стрічок у періодичних структурах. Отримано строгі розв'язки задач про дифракцію на двох напівнескінченних періодичних решітках, які лежать в одній площині. На їх базі вивчено розсіювальні властивості дефектів типу зсуву стрічок у періодичній решітці. Досліджено ефекти, пов'язані з проходження плоскої електромагнітної хвилі через хвилевідний канал, утворений відсутніми стрічками у двошаровій решітці. Запропоновано спосіб керування шириною діаграми спрямованості поля, яке пройшло, як у випадку ідеально провідних, так і графенових стрічок.

Дисертантом побудовано строгі моделі розсіяння електромагнітних хвиль на структурах, дифраговані поля у яких є суперпозицією полів плоских, циліндричних і сферичних хвиль. Досліджено електромагнітний взаємозв'язок напівплощини та дисків. Ця структура подається як об'єднання класичних об'єктів, розв'язки задач про дифракцію на яких є відомими. Взаємозв'язок об'єктів описується за допомогою амплітуд Фур'є, які знайдено з операторних рівнянь. Показано, що ці операторні рівняння зводяться до інтегральних і розв'язуються з використанням запропонованої схеми дискретизації.

Досліджено властивості скінченних та нескінченних періодичних багатошарових решіток з графенових стрічок нульової товщини. Увагу приділено зменшенню часу обчислень за рахунок використання ітераційної процедури запису рівнянь. Встановлено положення плазмонних резонансів вздовж частотної осі. У дисертації встановлено ступінь взаємозв'язку графенових стрічок у періодичній решітці. Показано, що стрімке зростання поглинання та зростання енергії власних хвиль діелектричних хвилеводів має місце поблизу резонансів на решіткових модах. Запропоновано способи ефективного керування потужністю збуджених власних хвиль плоских хвилеводів, а також потужністю випроміненого поля за рахунок зміни хімічного потенціалу графену. Показано, що послідовне збудження плазмонних резонансів і резонансів багатошарової структури дозволяє розширити зону, у якій спостерігається максимальне поглинання, а одночасне збудження резонансів дозволяє збільшити поглинання.

Підхід, при якому розсіювач подано як об'єднання більш простих плоских нескінченних вздовж однієї з осей декартової системи координат екранів, поширено на структури з осьовою симетрією. Розглянуто, наприклад, дифракцію плоскої і сферичної хвилі на кільці у вільному просторі. Кільце подано як об'єднання двох класичних об'єктів – диску і круглого отвору, оператори яких є відомими. Наведено результати стосовно скінченних та напівнескінченних періодичних систем аксіально-симетричних неоднорідностей у круглому хвилеводі.

Достовірність і обґрунтованість отриманих результатів не викликає сумнівів. У дисертації низку задач розв'язано різними методами, що посилює впевненість у їх коректності. В окремих граничних випадках проводиться порівняння з результатами, відомими з літератури або з результатами, отриманими за допомогою комерційних пакетів. Достовірність результатів підтверджується числовою перевіркою виконання граничних умов, закону збереження енергії та відповідністю фізичним закономірностям. Також для розглянутих задач проводиться числовий аналіз швидкості збіжності наближеного розв'язку до точного.

Наукова і практична значимість полягає у тому, що у дисертації створено ефективний інструмент для аналізу характеристик цілої низки електродинамічних

систем, які мають у своєму складі послідовності плоских екранів. Запропоновані моделі нескінченних періодичних решіток зі збоєм періодичності дозволяють використовувати їх при аналізі дефектів у періодичних системах. Низка нових фізичних закономірностей відносно впливу краю, а також стосовно розсіяння на структурах з імпедансних розсіювачів, здатних поглинати електромагнітне поле, можуть знайти своє використання при створенні поглиначів. Отримана інформація стосовно трансформації хвиль графеновими решітками дозволяє використовувати досліджені фізичні ефекти у якості ключових при реалізації функції керування в антенах витікаючої хвилі та фільтрах. Результати чисельного моделювання дозволяють визначити сукупності параметрів досліджуваних структур, при яких спостерігається найбільш ефективна їх робота. Ефективність чисельних реалізацій розроблених алгоритмів дозволяє прогнозувати їх використання в системах автоматизованого проектування НВЧ пристроїв.

Розробка теоретичних методів сприяє зменшенню витрат на ресурсомісткі експериментальні дослідження, а також раціональному використанню обладнання, а розвиток методів паралельної оптимізації параметрів на базі генетичного алгоритму сприяє підвищенню ефективності розв'язання відповідних задач.

Результати кандидатської дисертації Каліберди М.Є. "Метод спектральних операторів розсіяння у задачах дифракції хвиль на багатоелементних послідовностях неоднорідностей" у його докторській дисертації не використовувалися.

Автореферат повністю відповідає змісту і основним положенням дисертації.

Зауваження та недоліки. Дисертація виконана на високому науковому рівні, проте не позбавлена недоліків.

1. У першому і сьомому розділах отримано операторні рівняння, ядра яких містять особливості типу полюс. Після проведення процедури регуляризації ядра рівнянь стають регулярними. Автор не пояснює, з якою метою рівняння із вже регулярними ядрами зводяться до сингулярних. Також не пояснюється, чи такі сингулярні рівняння мають єдиний розв'язок.

2. Автор стверджує, що провідність графену залежить від частоти, хімічного потенціалу, часу релаксації електронів та від температури. Більшість графіків побудовано для одного й того ж значення часу релаксації 1 пс. і температури 300 К. Значення часу релаксації змінено лише на одному графіку. Необхідно було б дослідити вплив температури і більш докладно розкрити вплив часу релаксації на розсіяне поле.

3. У четвертому розділі досліджено розсіяні поля двошарової нескінченної решітки без скінченної кількості стрічок. Автору варто було б також провести дослідження стосовно того, яку саме кількість стрічок у такому нескінченному масиві необхідно врахувати, щоб побудована модель адекватно відображала властивості реальної скінченної структури.

4. У розділах 5, 6 розглянуто графенові решітки у діелектричних середовищах. Проте матеріал середовища передбачається без втрат. Варто було б також розглянути матеріал середовища зі втратами.

5. У багатьох розділах невдало вибрано позначення для похибки, яке співпадає з позначенням відносної діелектричної проникності, використовуваним у дисертації.

Проте, вказані зауваження не зменшують загального позитивного враження від роботи, не зменшують наукове значення та актуальність дисертації.

Висновки по роботі в цілому. Дисертаційна робота Каліберди М.Є. “Чисельно-аналітичні методи в теорії дифракції хвиль на плоских екранах” є завершеною науковою працею. Отримані нові наукові результати стосовно дифракції хвиль на системах таких ідеально-провідних або імпедансних плоских перешкод, як стрічки, диски, щілини, кільця у вакуумі, у матеріальному середовищі або хвилеводі роблять значний внесок у розвиток сучасної радіофізичної науки. Робота має внутрішню єдність, основні її результати вірно і повно відображено в опублікованих матеріалах та отримані автором особисто. Дисертація відповідає усім вимогам “Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17.11.2021 р. № 1197 (зі змінами, внесеними згідно з постановами Кабінету Міністрів України № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент:

провідний науковий співробітник

Відділу теорії хвильових процесів

та оптичних систем діагностики

ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України,

лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,

доктор фізико-математичних наук,

професор



Дозислав КУРИЛЯК

