

ВІДГУК

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

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Розвиток чисельно-аналітичних методів у електродинаміці періодичних структур, чому присвячена дисертаційна робота М.Є Каліберди, є надзвичайно актуальним напрямом в радіофізиці. Вони дозволяють ефективно вирішувати задачі, що стоять на стику теоретичної та прикладної електродинаміки, забезпечуючи високу точність та швидкість моделювання, що є важливим не лише для отримання нових знань, а й для розвитку напрямностей практичних застосувань. В умовах стрімкого розвитку сучасних технологій, таких як фотоніка, нанотехнології, НВЧ-техніка та метаматеріали, вивчення взаємодії електромагнітних хвиль з періодично організованими середовищами, такими як, наприклад, ґратки, в тому числі і графенові, метаматеріали, фотонні кристали, надпровідні структури і т. ін., має незаперечне фундаментальне і прикладне значення. Фундаментальною науковою проблемою, на вирішення якої спрямовано дослідження в дисертації - це побудова фізично коректних моделей, які базуються на використанні як ідеально провідних, так і імпедансних плоских екранів, що аналітично враховують умови випромінювання та умови на ребрі, і дозволяють отримати результати з будь-яким наперед заданим ступенем точності, з довільним співвідношенням параметрів і за прийнятний комп'ютерний час. Вирішення зазначеної проблеми дозволяє вказати нові ефективні шляхи розв'язання цілого ряду прикладних задач, в тому числі задачі дистанційної дефектоскопії в багатошарових багатоелементних періодичних структурах шляхом аналізу розсіяних полів, задачі керування характеристиками діаграм спрямованості антен за рахунок виключення елементів з періодичного масиву, задачі створення та суттєвого покращення робочих характеристик відомих радіотехнічних і радіоелектронних систем.

Тому тема дисертаційної роботи, присвяченої розвитку чисельно-аналітичних методів в теорії дифракції електромагнітних та акустичних хвиль на ідеально провідних та імпедансних плоских екранах, розташованих у вільному просторі, у плоских діелектричних хвилеводах, у хвилеводах з ідеально провідними стінками є **важливою, корисною і актуальною**. І її актуальність лише зростає завдяки стрімкому розвитку техніки та обчислювальних методів.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Матеріали дисертації є складовою частиною держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР), номери державної реєстрації 0111U010367, 0112U000563, 0115U000465, 0116U000819, 0123U102871, 0116U000036, 0119U002540, 0118U002038, 0117U004964, 0119U002535, 0122U001486, 0122U001436, 0124U000670.

3. Ступінь наукової обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації та їх достовірність

Наукові результати, висновки та рекомендації, що отримані в роботі, не суперечать загальновідомим положенням сучасної радіофізики. Їх достовірність зумовлена застосуванням комплексу сучасних методів досліджень, математичною коректністю постановки та розв'язання задач, прозорим фізичним тлумаченням результатів математичного моделювання та узгодженістю отриманих результатів з результатами інших авторів, або з результатами, отриманими за допомогою комерційних пакетів. Формулювання граничних умов і постановку граничних задач виконано в рамках широко відомих ідеалізацій (двовірність задач, ідеальна провідність стрічок, скалярна природа провідності графену та ін.). Методи, які розвинені, є математично обґрунтованими, збіжність наближеного розв'язку до точного підкріплюється відповідними математичними теоремами. Всі отримані результати, що наведені в дисертації, пройшли рецензування в фахових журналах та доповідалися на міжнародних конференціях і семінарах за участі провідних вчених в галузі обчислювальної і прикладної радіофізики. Таким чином, можна зробити висновок про високий ступінь **наукової обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, та їх достовірність.**

4. Структура та зміст дисертації

Дисертаційна робота складається з вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел та переліку публікацій автора за темою роботи і п'яти додатків. Обсяг дисертації становить 539 сторінок, із них 414 сторінок основного тексту, з 5 таблицями, 243 рисунками та 314 бібліографічними джерелами, що відповідає чинним вимогам до докторських дисертацій.

У вступі (стор. 42-57) наведено загальні проблеми сучасного стану в математичному моделюванні та теоретичних дослідженнях явища дифракції електромагнітних хвиль на плоских ідеально провідних або матеріальних перешкодах, сформульовано актуальність, мету і задачі проведених досліджень, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, а також наведено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Надається ступінь апробації та перелік публікацій за темою дисертації та особистий внесок М.С. Каліберди у наукових публікаціях.

Перший розділ (стор. 58-175) присвячено дослідженню дифракції плоскої електромагнітної хвилі на напівнескінчених періодичних, а також скінченноелементних та нескінчених періодичних стрічкових решітках. З використанням операторного методу вперше отримано строгий розв'язок задачі про дифракцію для напівнескінченної періодичної решітки типу жалози. Вивчено вплив краю стрічкових решіток на характеристики розсіяних полів, які мають як дискретний (плоскі хвилі), так і неперервний (циліндричні хвилі) спектри. Запропоновано процедуру регуляризації для виключення особливостей ядер операторних рівнянь для напівнескінчених структур. Проведено аналіз полів, розсіяних структурами, у ближній та далекій зонах для різних значень кута падіння, ширини стрічок та періоду.

Другий розділ (стор. 176-196) присвячений дослідженню електродинамічних характеристик плоскої нескінченної стрікової решітки з порушенням періодичності у вигляді відсутності однієї стрічки. Для цього використовується метод сингулярних інтегральних рівнянь. Розсіяне поле подається як сума поля струмів, які течуть стрічками нескінченної

періодичної решітки і поля корекції, викликаного відсутністю стрічки. Проведено числове дослідження характеристик поля корекції, його розподіл в ближній і далекій зоні, що дозволило розкрити закономірності його поведінки. У картині поля корекції у ближній зоні максимум амплітуди поблизу відсутньої стрічки є чітко помітним, що дозволяє застосовувати побудовану модель при виявленні дефектів.

Третій розділ (стор. 197-229) присвячений розв'язку задачі про дифракцію плоскої H -поляризованої електромагнітної хвилі на двох напівнескінченних періодичних решітках, розташованих в одній площині, з довільним зазором між ними. Розглядалися випадки як ідеально провідних, так і імпедансних стрічок нульової товщини. Взаємодію двох напівнескінченних решіток, а також вплив зазору між стрічками нескінченної періодичної решітки, описано за допомогою поля корекції, збудженого струмами корекції. Отримано операторне рівняння відносно амплітуд Фур'є поля, яке описує взаємозв'язок двох напівнескінченних решіток. Показано, що у випадку ідеально провідних стрічок глобальний максимум інтегральної характеристики струмів корекції спостерігається при мінімальному значенні зазору, а також поблизу аномалій Релея-Вуда. У випадку графенових стрічок, максимумами також спостерігаються поблизу плазмонних резонансів.

Четвертий розділ (стор. 230-255) надає детальний аналіз ефектів, що виникають при видаленні деякої кількості стрічок із двошарової нескінченної періодичної решітки під дією H -поляризованої хвилі. У дослідженні використано два підходи: операторний метод і метод сингулярних інтегральних рівнянь. Методом сингулярних інтегральних рівнянь знайдено точні розв'язки задачі дифракції для ідеально провідних та імпедансних стрічок нульової товщини. Особливу увагу приділено числовому аналізу збіжності методів і порівнянню отриманих результатів з відповідними даними для скінченної двошарової решітки.

Показано, що шириною головного пелюстка діаграми спрямованості можна керувати за рахунок зміни частоти або періоду решітки. Для стрічок, виготовлених із графену, управління шириною головного пелюстка можливе також за рахунок зміни хімічного потенціалу графену. Це додає додатковий ступінь свободи для проектування відповідних пристроїв.

П'ятий розділ (стор. 256-332) присвячений удосконаленню та застосуванню методу сингулярних інтегральних рівнянь для аналізу скінченноелементних і нескінченних періодичних решіток, що складаються з імпедансних стрічок нульової товщини. Ці решітки занурені в діелектричну пластину, яка може бути розташована на ідеально провідній площині. Особлива увага приділяється випадку падіння H -поляризованої плоскої хвилі та власної хвилі діелектричного хвилеводу. Для скінченних решіток регулярна частина ядра рівнянь представлена інтегралом, підінтегральна функція якого має особливості на дійсній осі, що відповідають постійним поширення власних хвиль діелектричного хвилеводу. Для усунення цих особливостей застосовано процедуру регуляризації, що значно покращує точність і стабільність розв'язків. Проведено детальне дослідження частотних залежностей характеристик розсіяння та поглинання при різних параметрах, таких як геометричні розміри стрічок, властивостей діелектричної пластини та хімічного потенціалу графену. Використання графену, як імпедансного матеріалу, відкриває нові можливості для управління характеристиками решіток. Розглянуто випадок падіння власної хвилі діелектричного хвилеводу. Діаграми спрямованості випроміненого поля демонструють тут частотно

скануючий характер. Головний пелюсток діаграм спрямованості поблизу резонансів на решіткових модах, є ортогональним до площини хвилеводу.

Шостий розділ (стор. 333-366) присвячений дослідженню електродинамічних властивостей багатошарових систем, що складаються з імпедансних стрічок нульової товщини. Особливу увагу приділено скінченним і напівнескінченим періодичним багатошаровим решіткам. Для багатошарової системи скінченних решіток у вакуумі отримано два розв'язки: методом сингулярних інтегральних рівнянь і операторним методом. Слід відзначити, що для скінченної кількості шарів операторні рівняння мають однаковий вигляд, як у разі, коли поодиноким шар є нескінченною періодичною решіткою, так і у разі, коли поодиноким шар є скінченною решіткою. Доведено, що операторні рівняння є еквівалентними рівнянням Фредгольма другого роду (інтегральним у випадку скінченноелементних решіток, матричним у випадку періодичних решіток). У випадку багатошарової системи встановлено, що збудження плазмонних резонансів та резонансів власних хвиль періодичної частини структури, які відбуваються послідовно вздовж частотної осі, дозволяє розширити смугу частот із максимальним поглинанням. Визначено параметри, за яких коефіцієнт поглинання досягає свого максимуму завдяки одночасному збудженню кількох типів резонансів

Сьомий розділ (стор. 367-423) присвячений розв'язку скалярної задачі дифракції акустичної плоскої хвилі на нескінченно тонкому м'якому чи твердому кільці та векторної задачі дифракції електромагнітної плоскої хвилі на ідеально провідному кільці. Оператори розсіяння цих двох класичних об'єктів вважаються відомими. Амплітуди Фур'є знайдено з операторних рівнянь, які є еквівалентними інтегральним рівнянням Фредгольма другого роду. Операторний метод розвинено на структури, розсіяні поля в яких складаються з полів плоских, циліндричних і сферичних хвиль. Окремо розв'язано задачі про дифракцію плоскої електромагнітної хвилі на напівплощині і диску, які лежать в одній площині; на напівплощині і диску, які лежать у паралельних площинах та на напівплощині та двох дисках, які лежать у паралельних площинах. Досліджено поведінку полів у ближній та далекій зонах, в тому числі випадки, коли диски знаходяться у області тіні від напівплощини, в області напівтіні та в області, що повністю освітлюється падаючою хвилею. Показано, що за рахунок розсіяння плоскої хвилі на краю напівплощини поле сферичних хвиль має відмінну від нуля амплітуду навіть у випадку, якщо диски знаходяться цілком у області тіні та не освітлюються падаючою плоскою хвилею.

Восьмий розділ (стор. 424-463) присвячено побудові строгої моделі розсіяння власних аксіально-симетричних хвиль круглого хвилеводу на скінченній та напівнескінченній періодичній системі аксіально-симетричних неоднорідностей, таких як кругла діафрагма, диск, кільце, кільцева щілина та прямокутна гофра. Для розв'язку задачі про дифракцію на ключових неоднорідностях використовувався метод моментів. Досліджувалися залежності коефіцієнта відбиття від геометричних параметрів та частоти. Показано, що при наявності втрат у середовищі властивості скінченноелементної структури наближаються до властивостей напівнескінченної при збільшенні числа розсіювачів. З використанням паралельного генетичного алгоритму проведено оптимізацію параметрів круглого хвилеводу з системою щілин у порожньому внутрішньому провіднику з діелектричними шайбами.

Висновки (стор. 464-471) зроблені за проведеними в дисертаційній роботі дослідженнями і охоплюють весь обсяг отриманих результатів.

Дисертація є завершеним науковим дослідженням, в якому вирішена актуальна наукова проблема розвитку чисельно-аналітичних методів в теорії дифракції хвиль на багатоелементних структурах та всебічного дослідження електродинамічних характеристик таких систем, включаючи системи, які базуються на використанні як ідеально провідних, так і імпедансних плоских екранів, і вона робить вагомий внесок в розвиток фізичних уявлень про закономірності і властивості фізичних процесів в таких структурах.

5. Наукова новизна отриманих в роботі результатів, сформульованих положень та висновків

Наукова новизна дисертаційної роботи М.Є. Каліберди визначається розробкою чисельно-аналітичних методів для розв'язання крайових задач електродинаміки, на основі яких з використанням сучасних комп'ютерних технологій запропоновано узагальнюючі моделі й ефективні алгоритми для всебічного дослідження явища дифракції хвиль на різного роду неоднорідностях з довільною топологією та матеріальними параметрами, що дозволяють на строгому електродинамічному рівні знаходити характеристики розсіяних полів і встановлювати нові закономірності взаємодії таких структур з падаючими полями різної природи. Слід відзначити такі основні результати, отримані в дисертаційній роботі:

- отримано розв'язок задачі про дифракцію плоскої електромагнітної хвилі на напівнескінченній періодичній стрічковій решітці типу жалюзі. Показано, що властивості решітки можна визначити за допомогою нелінійного операторного рівняння, яке після дискретизації та регуляризації сингулярних інтегралів, розв'язується чисельно з використанням ітераційної процедури з параметром релаксації та методу Зейделя;

- для розв'язання задачі про дифракцію хвиль на плоскій напівнескінченній періодичній стрічковій решітці для двох поляризацій вперше застосовано метод сингулярних інтегральних рівнянь;

- для аналізу плоскої напівнескінченної періодичної стрічкової решітки розвинено два абсолютно різні підходи. В першому випадку розсіяне поле представляється як сума поля струмів, які течуть стрічками нескінченної ідеально періодичної решітки і струмів корекції, збуджених за рахунок наявності краю. Ці струми знайдено у результаті розв'язання сингулярних інтегральних рівнянь. При використанні другого підходу отримано операторні рівняння відносно амплітуд Фур'є розсіяного поля і застосовується трансляційна симетрія напівнескінченної періодичної структури;

- показано, що за рахунок введення додаткової плоскої стрічкової решітки в область над напівнескінченною решіткою типу жалюзі вдається суттєво зменшити відбиття циліндричної хвилі, збудженої за рахунок наявності краю, в бік опромінювача. Амплітуда відбитого поля предканторовою напівнескінченною ножовою решіткою є значно меншою за амплітуду відбитого поля напівнескінченною ножовою решіткою у разі, коли кожен шар – це одноелементна плоска решітка;

- отримано розв'язок задачі про дифракцію електромагнітних хвиль на нескінченних імпедансних решітках зі стрічок нульової товщини з порушенням періодичності, серед них: напівнескінченна періодична решітка, решітка з порушенням періодичності у вигляді відсутності елемента, зсуву стрічок, двошарова нескінченна решітка з порушенням періодичності у вигляді відсутності скінченної кількості стрічок у кожному шарі.

- вперше строгими методами розглянуто графенові стрічкові решітки з порушенням періодичності. Використання таких новітніх матеріалів, як графен, провідність якого залежить від хімічного потенціалу і може бути змінена динамічно, дозволяє додати ступені свободи і ефективно керувати характеристиками розсіяних полів, формуючи електромагнітні поля з заданими характеристиками, прогнозувати створення настроюваних пристроїв, в тому числі й у перспективному ТГц діапазоні;

- отримано строгий розв'язок задачі про дифракцію Н-поляризованої хвилі на двошаровій нескінченній періодичній решітці у відсутності скінченної кількості стрічок у кожному шарі. Встановлено, що плоска хвиля може проходити крізь хвилеводний канал, сформований відсутніми стрічками, у область поза решіткою навіть у зоні заширення відповідної нескінченної ідеально періодичної структури, збуджуючи циліндричну хвилю. Показано, що при використанні графенових стрічок значенням максимуму головного пелюстка можна керувати за рахунок зміни хімічного потенціалу. Ця властивість є основою для створення антен з частотно керованою шириною та динамічно керованим максимумом головного пелюстка;

- розвинено операторний метод для строгого розв'язку задач про дифракцію плоскої електромагнітної хвилі на напівплощині в присутності нескінченно тонкого ідеально провідного кільця або кільцевого отворі у площині, коли розсіяні поля є суперпозицією плоских, циліндричних та сферичних хвиль. Доведено, що операторні рівняння можна звести до інтегральних рівнянь, які, після проведення процедури регуляризації, в свою чергу, можна дискретизувати з використанням квадратурних формул і розв'язати чисельно. Показано, що за рахунок розсіяння плоскої хвилі на краю напівплощини поле сферичних хвиль має відмінну від нуля амплітуду навіть у випадку, якщо диски знаходяться цілком у області тіні та не освітлюються падаючою плоскою хвилею;

- з використанням операторного методу побудовано строгую модель розсіяння власних аксіально-симетричних хвиль на системі аксіально-симетричних неоднорідностей у круглому хвилеводі. Розв'язок ключової задачі отримано методом часткових областей у поєднанні з методом моментів. Розглянуто як скінченну, так і напівнескінченну періодичну послідовність. Запропоновано метод оптимізації на базі генетичного алгоритму, що дозволило скоротити час розрахунків завдяки здійсненню паралельних обчислень і за рахунок збереження в пам'яті операторів розсіяння вже розглянутих неоднорідностей.

6. Практичне значення одержаних результатів

Мета проведених в дисертаційній роботі досліджень полягає в розвиненні строгих чисельно-аналітичних методів до розв'язання задач про дифракцію хвиль різної фізичної природи (акустичних, електромагнітних) на структурах з періодичним розміщенням розсіювачів, в тому числі скінченноелементних періодичних, нескінченних періодичних, нескінченних зі збоєм періодичності, напівнескінченних періодичних і їх комбінаціях для аналізу характеристик розсіяних полів і проводити оптимізації параметрів по вибраних критеріях. Сукупність отриманих результатів зробили вагомий внесок в розвиток наукового напрямку – електродинаміку періодичних структур, розширили фундаментальні знання про фізичні процеси взаємодії полів різної природи зі складними композиційними електродинамічними структурами і мають важливе практичне значення. Побудовані у вигляді алгоритмів математичні моделі дозволили реалізувати ще один етап в еволюції важливого

напрямку прикладної електродинаміки, який пов'язано зі створенням систем автоматизованого проектування частотно-селективних поверхневих, антенних систем, фільтрів, цілого класу керованих збуджувачів, поглиначів надвисокочастотного, субтерагерцового та терагерцового діапазонів частот. Це є суттєвим кроком вперед для втілення ідеї створення концептуально інтелектуальних структур, в яких кожна елементарна комірka не тільки включає в себе свої власні сенсорні, програмовані, обчислювальні і виконавчі функції, але також може обмінюватися інформацією з іншими комірками для аналізу ситуації в оточенні та інтелектуальне управління функціями, як на рівні структури, так і на рівні системи в цілому.

7. Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях

Основні результати дисертації опубліковано у 79 працях: 4 монографіях¹ (1 з яких англomовна у видавництві Cambridge Scientific Publishers), 11 статтях у наукових фахових виданнях України, 29 статтях у фахових виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS, 1 статті у фахових закордонних виданнях (які не входять до SCOPUS), 34 тезах доповідей на наукових конференціях. Також наукові результати додатково відображено у 7 статтях, 2 тезах доповідей, 9 свідоцтвах про авторське право.

8. Мова та стиль дисертації

Дисертаційну роботу написано державною мовою та науковим стилем із застосуванням загальноприйнятої наукової термінології. Результати досліджень викладено зрозумілою мовою та в логічній послідовності. Отримані результати, наукові положення та висновки наведено чітко та недвозначно. Результати проілюстровано рисунками та графіками, що є адекватними та добре зрозумілими.

9. Дискусійні положення та зауваження щодо дисертаційної роботи

Незважаючи на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, в ній мають місце дискусійні положення та виникають певні зауваження:

1. У розділі 1 автор порівнює числові результати, отримані двома методами: методом сингулярних інтегральних рівнянь і з використанням операторного методу для плоскої напівнескінченної решітки. З цього робить висновок про їх достовірність. Для більш наочної демонстрації достовірності варто було б також виконати аналітичне порівняння результатів. Для цього можна було б надати вирази, які зв'язують розв'язки, отримані цими двома методами, аналогічні тим, що наведені для двох напівнескінчених решіток на с.213.

2. У розділах 1-4 розглядаються графенові стрічки у вакуумі. Проте частіше в результаті виробництва графен наноситься на діелектричну підкладку. У списку літератури бракує посилань на роботи, у яких пропонуються технології створення графенових стрічок у вільному просторі без підкладки.

3. У розділах 5, 6 при аналізі графенових структур розглянуто лише випадок *H*-поляризації. Немає достатніх пояснень відсутності уваги до випадку *E*-поляризації.

4. У зв'язку з тим, що у розділі 5 отримано результати, які можуть бути застосовані при створенні керованих антен, підсилити прикладний аспект можна було б надавши залежності коефіцієнта спрямованої дії від параметрів структури та частоти.

5. Для деяких графіків не надано всіх параметрів структури.

а) У пункті 1.1.4. не вказано, для яких стрічок наводиться графік дослідження збіжності, для ідеально-провідних чи імпедансних.

б) Для графіків на рис.6.9 не вказано кількість стрічок та їх ширину.

в) На рис.5.18 наведено чотири криві, проте не надано пояснень, для яких саме значень параметрів побудовано кожна з них.

б. Є декілька друкарських помилок. Наприклад, с.191, “ппдання” замість “подання”. На с.14 автореферату “при виключені” замість “при виключенні”

Зазначені зауваження не впливають принципово на високу позитивну оцінку результатів проведених досліджень та їх практичну цінність.

10. Відповідність автореферату змісту дисертаційної роботи

Автореферат за структурою та оформленням відповідає чинним вимогам. В ньому відображені основні результати дисертаційної роботи та наукові здобутки автора. Зміст автореферату повністю ідентичний тексту дисертаційної роботи.

11. Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам

Дисертаційна робота **Каліберди Мстислава Євгеновича «Чисельно-аналітичні методи в теорії дифракції хвиль на плоских екранах»** є завершеною кваліфікаційною науковою працею, виконаною здобувачем самостійно, в якій отримані нові, обґрунтовані наукові результати спрямовані на вирішення ключових проблем теорії дифракції хвиль на багатоеlementних структурах, побудові їх фізично коректних моделей та всебічного дослідження електродинамічних характеристик таких систем і проектуванню на цій основі нових радіофізичних систем.

Автореферат за змістом є ідентичним до тексту дисертаційної роботи, яка відповідає паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика.

Дисертація Каліберди М.Є. відповідає вимогам щодо уникнення академічного плагіату, фабрикації та фальсифікації та відповідає вимогам пп. 7,8,9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197, а її автор Каліберда Мстислав Євгенович заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент:

радник при дирекції
Інституту радіофізики та електроніки
ім. О.Я. Усикова НАН України
доктор фізико-математичних наук
академік НАН України

Підпис Мележика П.М. засвідчую
ВО вченого секретаря
ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України



Петро Мележик

О.В. Кривенко