

ВІДГУК

на дисертацію Ячина Володимира Васильовича «Розсіяння електромагнітних хвиль на тривимірних двоперіодичних багат шарових магнітоелектричних структурах», подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 - радіофізика

Актуальність. У дисертації автор представив розподіл методів розв'язання задач електродинаміки, пов'язаних із розсіюванням хвиль на періодичних структурах, на класи, диференціюючи їх за застосовністю в тій чи іншій частотній області, тобто на низькочастотні, високочастотні і середньохвильові. На наш погляд, найбільш прийнятним є розбиття цих методів моделювання на методи аналітичні, чисельно-аналітичні й прямі чисельні. З точки зору обчислювальної електродинаміки, важливість дисертаційного матеріалу полягає в тому, що в ньому викладено новий метод розв'язання задач розсіювання, який належить до класу чисельно-аналітичних методів, що забезпечують точне моделювання в резонансній області, найбільш цікавій у мікрохвильовому діапазоні, що впливає з новітніх досліджень стосовно метаматеріалів. Справа в тому, що на цей час чисельні процедури, що використовують прямі методи, особливо сіткові, доведені до комерційної реалізації і повсюдно використовуються для моделювання електродинамічних процесів. Однак сфери їх застосування, хоч і вельми широкі, але, внаслідок уніфікованого підходу до всього частотного діапазону моделювання, є малоефективними в резонансній області. Такі методи можна використовувати для аналізу задач розсіювання, знаходячи інтуїтивно значущі або інтуїтивно прогнозовані ефекти, водночас отримуючи конкретні відомості для конкретного фізичного результату, і потім чисельно синтезувати потрібний об'єкт з найбільш яскравим проявом цього ефекту. Це не завжди вдається, тим більше, коли мова йде про застосування на практиці.

Водночас особливо актуальними є чисельно-аналітичні методи, які враховують ще на попередньому етапі розв'язання задачі розсіювання ті чи інші характерні особливості геометрії розсіювача. На аналітичному рівні включають спеціальні процедури обчислювальної математики, попередні розв'язання частинних завдань або, нарешті, залучають проєкційні процедури, що враховують граничні умови або умови на ребрах, тощо. Тоді вже на попередньому (аналітичному) етапі частина умов крайової задачі буде врахована. У результаті застосування таких процедур чисельно-аналітичне розв'язання дає набагато потужніший інструмент для пошуку рішень електродинамічних задач порівняно з прямими чисельними методами, особливо загальноприйнятими комерційними пакетами, наприклад, такими як Microwave Studio або HFSS. Останні базуються на загальних умовах постановки задачі розсіювання для просторової або часової областей дискретизації рівнянь Максвелла. Із вищесказаного випливає, що проблема створення інструменту аналізу задач розсіювання на тривимірних періодичних структурах, на порядок більш швидкого порівняно з прямими чисельними методами і, разом з тим, досить загального за широтою охоплення конфігурацій будови періодичної комірки, що розсіює електромагнітні хвилі, залишається **актуальною задачею** радіофізики.

Використовувані автором вихідні інтегральні рівняння відомі ще з середини минулого століття, десь із шістдесятих років, коли М. А. Хижняк запропонував об'ємні інтегральні рівняння в найзагальнішому вигляді для дослідження задач розсіювання. Однак на той момент рівень розвитку обчислювальної техніки і методів програмування не дозволяв навіть мріяти про широке використання подібних рішень. Загальне розв'язання таких рівнянь від реалізації рішення на конкретному класі задач (див. назву дисертації) відокремлює величезний пласт роботи, а саме: аналітичне опрацювання і проєкційне переформулювання проблеми; алгоритмізація з урахуванням існуючих засобів і реалізованих рішень обчислювальної математики; програмування мовою високого рівня, яке забезпечує застосовність алгоритму в різних програмних середовищах;

верифікація з електродинамічної точки зору; оцінювання і забезпечення необхідної точності розрахунків та ін. Отже, хоча використання таких інтегральних рівнянь не нове, автор реалізував новий метод, ґрунтуючись на даних інтегральних рівняннях, для періодичних структур загального вигляду. З огляду на вищесказане, вважаю, що автор **уперше вирішив проблему створення нового ефективного інструменту для розв'язання певного класу задач обчислювальної електродинаміки**, який дозволяє проводити розрахунки з необхідним ступенем точності.

Крім того, що представлено рішення саме по собі має цінність для багатьох завдань вже добре розвиненої хвилевідної НВЧ-електродинаміки або, зокрема, для розв'язання антенних задач (про це напевно згадає один з опонентів), має місце **особлива актуальність**, пов'язана зі створенням **метаматеріалів і наноструктур із метаматеріальними властивостями**. Справа в тому, що на відміну від уже знайдених рішень на основі загальних міркувань про побудову наноматеріалів, виявилось, що найефективнішими є періодичні структури з достатньо складною будовою періоду. На основі цих структур, виявляється, можна побудувати матеріальні об'єкти, що володіють унікальними властивостями з радіофізичної або з оптичної точки зору. Це, наприклад, фільтрові структури або покриття зі штучною оптичною активністю. На основі останніх уже заявлений шлях до негативної рефракції (Pendry), який реалізує ідеї надрозрізнення і радіоневидимості. У цьому плані особливо актуальним є розсіювальний об'єкт (тривимірна багатошарова періодична структура), на якому автор налагоджував новий алгоритм аналізу – 2D- або 3D-періодична структура з можливою неоднорідністю окремої комірки в усіх трьох напрямках. Важливо, що новий інструмент дозволяє враховувати і неоднорідність матеріальних параметрів у межах комірки, і втрати в матеріалі, і можливу гіротропію. Хоча така широка сфера застосування приводить, врешті-решт, до зниження швидкості розрахунків, але залишає її істотно вищою, ніж у комерційних алгоритмів. З огляду на достатню точність моделювання, це дозволяє знайти фізичні результати, а потім і технічні рішення для конкретних приладів. Це і робить розглянуті **об'єкти найбільш актуальними для застосування нового алгоритму розв'язання**.

Новизна. На перше місце я б тут поставив можливості, які відкриваються стосовно аналізу і синтезу періодичних метаструктур. З власного досвіду знаю, що недостатньо зафіксувати якийсь цікавий фізичний ефект – набагато складніше знайти геометрію (структуру) та матеріальний склад комірки, які забезпечать прояв цього ефекту в експерименті і, головне, майбутню технічну перспективу реалізації ефекту в приладі. На даний час переважна кількість робіт обмежується лише констатацією наявності ефекту, але не його доведенням до реалізації в конкретному приладі. Велике число ідей залишилися на рівні «можливе створення», не дійшовши до «вдалося отримати». Усе впирається в низьку швидкість або в неточність розв'язання завдань аналізу і, як результат, у відсутність синтезу хоча б геометрії, не кажучи вже про матеріальні параметри. Тому вважаю, що головний елемент новизни тут полягає в **новому інструменті точного моделювання**, який дозволяє отримувати характеристики з усіма атрибутами, характерними для точних розв'язків, коли, наприклад, всі резонансні точки або злами кривих виглядають так, як це повинно бути, і реалізуються в аналітичних рішеннях.

Разом з тим, автор уже продемонстрував конкретні результати і в галузі традиційних радіофізичних завдань частотно-селективних поверхонь, і в галузі метаматеріалів. Аби не заглиблюватися в їх огляд, наведу кілька **досить цікавих застосувань**:

оцінено властивості багатошарового покриття літальних об'єктів в умовах температурних змін. Це дозволяє у процесі проектування зробити висновки про стійкість таких покриттів. Тут важливо, що алгоритм дозволяє досить точно моделювати зміни обох матеріалів, з яких складається вуглепластик, з урахуванням омічних втрат;

наведено результати аналізу розсіювання хвиль від періодичних структур із прямокутних діелектричних паралелепіпедів і виявлено можливість маніпуляції резонансами відбиття і проходження, аж до їх суміщення. Вважаю, що виявлені резонанси обов'язково знайдуть застосування при створенні частотно-селективних екранів;

швидше за все, уперше розглянуто точне розв'язання задачі про взаємодію схрещених ґраткових структур за ближніми полями. Такі розв'язання описувалися раніше для паралельного або перпендикулярного розташування напрямних одновимірних ґрат. У випадку довільного кута схрещування між ґратами Р. Міттра пропонував використовувати певну ітераційну схему, досить трудомістку. Хоча результат у автора вийшов очікуваний (резонанс зсувається в бік, який визначається довгою діагоналлю відповідної ромбічної комірки), його практична цінність полягає у створенні перестроюваного квазіоптичного фільтра;

як дослідник, який останніми роками вивчає штучну оптичну активність, зазначу результат, що стосується решітки з прямокутних відрізків, які формують виток спіралі, і полягає в обертанні площини поляризації в резонансних точках. Подібні структури вже аналізувалися в літературі, проте створений автором інструмент аналізу дозволяє знаходити як найбільш цікаві ефекти (повне перетворення поляризації падаючої хвилі в крос-поляризовану компоненту при проходженні через структуру він уже знайшов), так і можливі технічні застосування;

звичайно, результати щодо розсіювання гауссових пучків також заслуговують на увагу, проте вони мають дещо ілюстративний характер і цікаві скоріше як «демонстрація перспективи». Точний розрахунок на базі ключового алгоритму дисертації явно можливий, але вимагатиме незмірно більших машинних ресурсів для інтегрування за спектром сталих поширення уздовж решітки.

Достовірність результатів дисертації сумнівів не викликає. По-перше, уже з перших чисельних моделей, а саме «моделей металевих решіток», наводиться верифікація даних на прикладі класичних робіт з частотно-селективних структур. Маю зазначити тут добрий збіг, хоча метал «імітується» магнітодіелектриком з потрібними «неідеальними» параметрами. По-друге, наводяться результати вимірювань в ІРЕ (за участю автора), що стосуються схрещеної решітки. І, нарешті, підкреслю співпрацю В.В. Ячина з відділом квазіоптики ІРЕ, що відомий своєю вимогливістю до достовірності моделей.

Практичне значення одержаних результатів дисертації В.В. Ячина визначається перш за все створенням і майбутнім практичним застосуванням нового інструменту пізнання. Справа в тому, що він дозволяє для багат шарових металодіелектричних структур вільно маніпулювати і кількістю, і товщиною шарів, і матеріальними параметрами з комплексними значеннями, і топологією, і симетрією об'єктів у межах періодичної комірки. Наприклад, можна використовувати спеціальні структури з гвинтовою або дієдральною симетрією різних порядків. Вважаю за можливе стверджувати, що подібний новий інструмент дослідження давно не з'являвся в чисельно-аналітичних алгоритмах обчислювальної електродинаміки – науки, яка зародилася саме в Харкові у 60-ті роки минулого століття у працях наукових шкіл В.П. Шестопалова, М.А. Хижняка, їх численних учнів і послідовників.

До числа **зримих недоліків тексту** дисертації віднесу досить «важкий» стиль викладу, коли різного роду визначення (місця, часу, об'єкта дії) рознесені вздовж одного речення. До таких недоліків треба віднести і недостатньо коректні висловлювання на кшталт «збільшення ефекту Фарадея в решітковому резонансі ...», написання прізвищ іноземних авторів кирилицею (наприклад, «Йі») та ін.

Огляд стану проблеми слабо структурований – до нього входять і методи виготовлення, і методи вимірювання характеристик. Без останніх можна було обійтися.

Недолік полягає і в переважному розробленні аналітичної та обчислювальної сторони питання, ніж у власне радіофізичному аналізі. Намагаючись продемонструвати різноманіття (дійсне!) застосувань запропонованого підходу, автор наводить у кожному предметному розділі (2, 3, 4, 5) результати яскравих застосувань, не заглиблюючись у власне електродинаміку відповідного ефекту. Так, наприклад, у випадку з інтерпретацією властивостей тришарового екрана резонансом на «замкнених» модах залишається не з'ясованим, яке коливання власне «замкнене», і до чого тут співвідношення розмірів отворів. Подібний **недолік можна вибачити, оскільки глобальне завдання автора було іншим – створити сам інструмент.**

Опубліковані роботи, так само як і автореферат, потрібною мірою відображають суть і повноту результатів дисертації В.В. Ячина.

Вважаю, що подана В.В. Ячиним дисертація **безумовно відповідає рівню вимог до докторських дисертацій з радіофізики (01.04.03)**, а її автор **безсумнівно гідний** присудження ступеня доктора фізико-математичних наук.

Офіційний опонент
Головний науковий співробітник
лабораторії обчислювальної електродинаміки
ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України,
доктор фіз.-мат. наук, професор

А. О. Кириленко

12 квітня 2018 року

Підпис офіційного опонента головного наукового співробітника лабораторії обчислювальної електродинаміки ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, доктора фіз.-мат. наук, професора
А.О. Кириленка засвідчую:

учений секретар ІРЕ ім. О.Я. Усикова
НАН України,
канд. фіз.-мат. Наук

І.С. Почаніна

