

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Бутрима Олександра Юрійовича "Застосування модових розкладань у широкосмугових задачах електродинаміки", подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Актуальність обраної теми. Використання широкосмугових сигналів – один із найбільш перспективних напрямків при створенні сучасних георадарів, радіолокаційних систем, інтроскопічних пристроїв, систем стійкого зв'язку на місцевості із складним рельєфом, систем ураження напівпровідникових пристроїв електромагнітним імпульсом і т.ін. Результативний науковий пошук тут не можливий без побудови модельної і алгоритмічної бази, яка дозволяє в процесі обчислювальних експериментів оптимізувати досліджувані структури, вивчати та закладати у відповідні конструкторські рішення принципово важливі закономірності та особливості процесів формування, випромінювання, розповсюдження та розсіювання імпульсів електромагнітного поля різної тривалості. Розв'язання подібних задач відбувається, в основному, за допомогою чисельних методів, в переважній більшості випадків – методом скінчених різниць у часовій області (FDTD). Хоча подібні методи є достатньо універсальними, але їх використання потребує значних комп'ютерних ресурсів, коректного усічення простору розрахунку відкритих задач, а обчислювальний характер ускладнює їх можливості щодо аналізу явища в цілому. Аналітичних методів дослідження електродинамічних задач в часовій області обмаль, в основному, вони тим або іншим чином базуються на застосуванні все того ж перетворення Фур'є, і тільки деякими авторами (наприклад, Борисовим В.В., Шварцбургом Ч.Ч., Нерухом О.Г., Третьяковим О.О. та Сіренко Ю.К.) рішення будуються безпосередньо в часовій області. Практично немає методів, що дозволяють аналітично досліджувати електродинамічні задачі часової області зі складними граничними умовами.

Багато досліджень в зазначеному напрямку проводиться на кафедрі теоретичної радіофізики Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. У цих дослідженнях розвивається запропонований Кисунько Г.В. в 1949 році, а потім формалізований Третьяковим О.О. в 1986р. метод модового базису (ММБ). Виконано цілий ряд робіт з розвитку та застосування цього методу до розв'язання низки нестационарних задач. Представлена дисертаційна робота узагальнює результати цих робіт та визначає основні особливості застосування зазначеного підходу для розв'язання різноманітних задач нестационарної електродинаміки з використанням модових розкладань.

Тема дисертаційного дослідження щільно пов'язана з пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки України, затвердженими директивними органами. Результати дисертації отримані при виконанні 7 держбюджетних науково-дослідних тем, а також міжнародного проекту CRDF First Step to Market Award UK-B1-573-KH-04: "Development & Validation of Computational Tools for

Quantification of Myocardial Ischemia", 2004-2006 pp., CardioMag Img., USA, в яких дисертант був відповідальним виконавцем або керівником.

Таким чином, **актуальність** досліджень, що проведені в дисертації Бутрима О.Ю. не викликає жодних сумнівів.

Характеристика роботи та новизна отриманих результатів

З шести розділів дисертації перший є оглядовим, а в п'яти наступних наведено новий матеріал, отриманий автором під час виконання досліджень.

В першому розділі зроблено огляд літератури за темою дисертації. Проаналізовано відомі методи розв'язання задач поширення імпульсних сигналів у лініях передачі з застосуванням техніки частотної та часової області. Підкреслено розбіжності між загальновідомим поняттям мод у частотній області та «модами», що вводяться у часовій області. Особливу увагу приділено методу модового базису, який є основним методом дослідження, описано історію його розвитку. Визначено коло питань, що потребують розгляду, та задачі, які потрібно розв'язати.

Другий розділ присвячено методу модового базису для неоднорідного хвилеводу з факторизованою залежністю матеріальних параметрів середовища від поперечних координат та від поздовжньої та часової координати. Отримано основні рівняння, що дозволяють дослідити поширення імпульсних сигналів в таких структурах. Для повноти викладу автором наведено огляд попередніх робіт за даною тематикою. Підкреслені важливі узагальнення методу розрахунку, зокрема узагальнення методу на випадок, коли перетин хвилеводу є багатозв'язною областю. Наведено приклад використання методу для розгляду задачі поширення імпульсу у плоско-паралельному хвилеводі з шаром діелектрику вздовж стінки хвилеводу. Наведено аналіз збіжності отриманого розв'язання. Підкреслено переваги розвинутого методу, зокрема можливість розділення складної чотиривимірної задачі на двовимірну задачу на визначення базису та одновимірну нестационарну задачу поширення для кількох пов'язаних хвиль.

Розділ 3 присвячений побудові модового базису у сферичній системі координат, що дає можливість розглядати регулярні конічні лінії з діелектричним заповнення. Зазначено, що методологія застосування методу залишається незмінною, отримано основні рівняння, що описують поширення імпульсних полів у зазначених структурах. Підкреслено фізичні особливості отриманих рівнянь. Зокрема те, що частоти відсічки, які розмежовують режим поширення та згасання, є залежними від радіусу поширення хвилі. На прикладі простої задачі про випромінювання кільця зі струмом перевірено збіжність розкладання за отриманими модами.

У розділі 4 розглянуто використання методу модового базису для розв'язання задач про поширення імпульсних полів у вільному просторі та у відкритому діелектричному хвилеводі. Зазначено, що у цьому випадку замість суми по модам слід використовувати інтеграл: спектр власних значень стає неперервним. На прикладі поширення імпульсного пучка у вільному просторі досліджено кривизну імпульсного фронту у ближній та проміжній зоні, а також

згасання амплітуди у проміжній зоні. Визначено поведінку «часового» та «амплітудного» центру для імпульсних хвильових пучків з різними параметрами. Далі у цьому ж розділі розглянуто застосування розвинутого методу до аналізу збудження та поширення імпульсних сигналів у відкритих діелектричних хвилеводах. Проведено моделювання поширення імпульсу при збудженні круглого діелектричного хвилеводу кільцевим струмом. Виявлено та проаналізовано нове фізичне явище, а саме імпульсну поверхневу хвилю-передвісник, яка поширюється вздовж хвилеводу зі швидкістю світла у вільному просторі, зберігаючи свою просторову структуру при поширенні. Отримані результати було порівняно з результатами розрахунку методом FDTD.

В розділі 5 розглянуто низку задач дифракції, які можуть бути доволі легко розв'язані з використанням концепції модових розкладань. Застосовано метод операторів дифракції, які є операторами типу згортки. Виявлено та пояснено ефект коливання поверхневого та об'ємного зарядів поблизу межі розділу різних середовищ у хвилеводі, які виникають при падінні імпульсної хвилі на межу провідного середовища. Для розв'язання більш складних задач дифракції відомий у частотній області метод узгодження мод перенесено до часової області. Метод було апробовано на кількох простих структурах: стрибку у плоско-паралельному хвилеводі, стику коаксіального та круглого хвилеводів, та, зокрема, при розв'язанні задачі про імпульсне випромінювання біконічної антени. Отримані результати порівнювались з результатами розрахунку іншими методами.

Розглянуто задачу дифракції E-поляризованої хвилі на тонкому провідному дроті. Виявлено ефект аномального широкосмугового поглинання у тонкому провідному дроті, коли перетин поглинання на кілька порядків перевищує геометричні розміри дроту. Запропоновано наближену модель, що пояснює фізичні особливості виявленого ефекту у широкому діапазоні зміни параметрів задачі.

Розділ 6 присвячений побудові методів просторової та часової фільтрації для виділення слабкого сигналу від локального джерела магнітного поля при наявності сильних завад від віддалених джерел при магнітометричних вимірах. Запропоновано алгоритми просторової фільтрації, що допомагають виділити корисний сигнал. Проведено чисельні експерименти, що демонструють ефективність запропонованих методик. Проведено моделювання вимірювальної системи та визначено її оптимальні параметри.

В висновках приведені основні результати роботи.

Оцінка обґрунтованості наукових положень дисертації, їхньої достовірності і новизни.

Наукові результати, висновки та рекомендації, 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.

Новизна отриманих результатів полягає в наступному:

– Удосконалено метод модового базису для розв'язання задач про поширення імпульсних сигналів у закритих циліндричних та конічних хвилеводах з багатозв'язною областю поперечного перетину і факторизованою залежністю матеріальних параметрів середовища, а також у відкритих діелектричних хвилеводах. Розроблені і протестовані обчислювальні схеми розв'язання відповідних рівнянь.

– Виявлено та проаналізовано нове фізичне явище, а саме - імпульсну поверхневу хвилю-передвісник, яка поширюється вздовж діелектричного хвилеводу зі швидкістю світла у вільному просторі, зберігаючи свою просторову структуру при поширенні.

– Отримано в явному вигляді вирази у часовій області для операторів дифракції на плоскій межі розділу середовищ у хвилеводі. Показано, що випадок рівних імпедансів або рівних показників заломлення середовищ потребує окремого дослідження та розв'язку. При цьому були отримані відповідні формули, з яких витікає рівність нулю оператора відбиття від такої межі.

– Вперше розв'язано задачу про падіння імпульсної E-хвилі на межу провідного середовища у хвилеводі та проаналізовані фізичні ефекти, що виникають при цьому.

– Запропоновано числово-аналітичний метод розв'язання задач хвилеводної дифракції на основі модових перерозкладань (метод узгодження хвиль) безпосередньо у часовій області.

– Вперше надано обґрунтоване пояснення ефекту аномального широкосмугового поглинання у тонких провідних дротах, коли перетин поглинання на кілька порядків перевищує діаметр дроту.

– Для задач магнітокардіографії побудовані методи обробки сигналів на основі просторової фільтрації та нестационарної фільтрації, що дозволяють виділяти надслабкі сигнали від серця за наявності сильних віддалених джерел завад.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає в наступному:

- Розроблено адекватний та ефективний метод для розв'язання різноманітних задач збудження, поширення, дифракції та випромінювання імпульсних сигналів у широкому класі хвилеводних структур.
- На основі виявленого ефекту поширення імпульсної поверхневої хвилі у діелектричному хвилеводі можливе створення нового класу резонансних пристроїв на основі конічних метало-діелектричних структур.
- Аналіз явища аномального поглинання у тонких провідних дротах дає можливість створювати ефективні поглинаючі структури на основі цього ефекту.

- Розроблені методи просторової та часової фільтрації для систем магнітокардіографії безумовно є дуже цінними для проектування таких систем та створення алгоритмів обробки даних для них.

Повнота висвітлення матеріалів дисертації в опублікованих працях, зміст автореферату та співвідношення результатів, отриманих в кандидатській дисертації, з результатами докторської дисертації

Матеріали дисертації з достатньою повнотою опубліковані у 26 статтях та 43 тезах міжнародних та українських конференцій.

Зміст автореферату є ідентичним основним положенням дисертації.

Результати наукових досліджень, за якими здобувач захистив кандидатську дисертацію, використовувались лише в оглядовій частині, дисертант усюди, коли це було потрібно, максимально чітко формулював новизну отриманих результатів порівняно з положеннями, які отримані в кандидатській дисертації.

Дисертація О.Ю.Бутрима має наступні недоліки та зауваження:

1. На мій погляд, автор обрав не досить вдалу назву дисертаційної роботи. Я вважаю, що словосполучення «у широкосмугових задачах» не є коректним. Краще зміст дисертаційних досліджень відображають слова «у задачах електродинаміки широкосмугових сигналів».
2. Автор при розгляді закритих циліндричних та конічних структур приділяє особливу увагу багатозв'язності контуру перетину хвилеводу та ТЕМ-модам, існування яких пов'язано з цим фактом, але при розгляді відкритих діелектричних хвилеводів чомусь обмежився постановкою задачі лише для суто діелектричних ліній без провідників. На мою думку, включення до розгляду відкритих ліній з провідниками не складає жодних проблем у рамках методу модового базису та могло б значно збільшити коло задач, що можуть бути розглянуті.
3. Було б цікавим, якщо б автор навів конкретні приклади структур, в яких може бути застосований ефект імпульсної поверхневої хвилі.
4. У розділі 4.6 при описі розрахункового методу було б доречним навести малюнок, що пояснює структуру обчислювального простору, як це зроблено в інших розділах.
5. Деякі отримані аналітичні результати є занадто громіздкими, що значно обмежує можливості їх аналізу, а отже і корисність. Наприклад, формула для оператора дифракції у розділі 5.2.1 займає майже усю площу сторінки.
6. У розділі 5.2.2 дублюється постановка задачі, яку було викладено у попередньому розділі 5.2.1.
7. Дисертаційна робота має ряд недоліків структурного характеру та пов'язаних з викладенням матеріалу. Наприклад, я вважаю, що підрозділ, присвячений побудові полюсних моделей провідності для моделювання реальних дисперсних речовин в часовій області, недоречно приведено в

оглядовому 1 розділі (стор. 42-54), бо він практично є викладенням однієї із публікацій автора.

Зроблені зауваження, перш за все, стосуються форми викладення матеріалу та оформлення дисертації, і, здебільшого, мають характер рекомендацій. Вони не ставлять під сумнів вірність, цінність та новизну основних положень та висновків дисертаційної роботи.

Загальний висновок

Вважаю що дисертаційна робота Бутрима О.Ю. «Застосування модових розкладань у широкосмугових задачах електродинаміки» присвячена вирішенню **важливої наукової проблеми**, виконана на високому науковому рівні, містить оригінальні та важливі наукові результати, задовольняє вимогам, що пред'являються Міністерством освіти і науки України до докторських дисертацій, а її автор Бутрима Олександр Юрійович заслуговує на присудження йому вченого ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент

Директор Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова,
доктор фізико-математичних наук,
член-кореспондент НАН України



[Handwritten signature]
01.10.2015р.

Мележик П.М.