

ВІДГУК

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

Актуальність обраної теми. Немає необхідності доводити важливість сучасних систем прийому, передачі і обробки інформації мікрохвильового та оптичного діапазонів. Посередниками в таких системах є імпульсні сигнали, які забезпечують високу пропускну здатність і необхідну роздільність. Аналіз розповсюдження таких сигналів і методи їх розрахунку складають предмет нестационарної електродинаміки, в тому числі і електродинаміки широкосмугових імпульсів. Розв'язок подібних задач відбувається, в основному, числовими методами, такими як метод скінченних різниць в часовій області (FDTD), метод інтегральних рівнянь та інші. Такі методи можуть бути застосовані майже до будь-яких структур, але вони пред'являють дуже високі вимоги до комп'ютерного забезпечення. До того ж, їх можливості загального аналізу всього явища в цілому обмежені конкретними умовами задачі. Для такого аналізу потрібні аналітичні методи дослідження електродинамічних задач в часовій області, але їх мало, а ті, що є, базуються, в основному, прямо чи побічно на застосуванні перетворення Фур'є, тобто на аналізі імпульсів у частотній області, і лише деякими авторами розв'язок будується безпосередньо в часовій області (наприклад, Борисов, Шварцбург). Таким чином, розвиток нових методів розв'язку електромагнітних задач у часовій області є **актуальним**.

Однією з важливих складових теорії та техніки сучасної нестационарної електродинаміки є поширення імпульсних хвиль у різноманітних лініях передачі. Особливо складними є задачі поширення імпульсів при наявності поперечної неоднорідності середовища, що часто являє собою камінь спотикання і у випадку досить вузькосмугових хвильових пакетів. Це пов'язане з неоднорідністю швидкості поширення різних частин імпульсу, внаслідок чого має місце постійна зміна структури імпульсу та обмін енергією між різними його частинами. Методи частотної області у цьому випадку можуть бути застосовані хіба що до поширення досить вузькосмугових хвильових пакетів, коли можна використовувати лінійне наближення для дисперсії постійної поширення у смугі сигналу і зовсім нехтувати залежністю модових розподілів від частоти. Поширення саме коротких імпульсних сигналів з надширокою спектральною смугою стало можливим моделювати лише з появою суто числових методів у часовій області. Головними проблемами таких числових підходів є значні вимоги до обчислювальних ресурсів, невелика точність, складність аналізу великої кількості просторово-часової інформації, що генерується при моделюванні. Цих недоліків можна уникнути застосуванням аналітичних та побудованих на їх основі аналітико-числових методів, що підходять для розв'язання задач поширення імпульсів, використовуючи значний математичний апарат для попереднього спрощення задачі, зменшення розмірності тощо. Але таких методів мало, підкреслює **актуальність** напрямку дослідження, обраного автором дисертації, де якраз зроблена вдала спроба побудови цілого класу таких аналітичних підходів та заснованих на них аналітико-числових схем.

Для масованої атаки на ці проблеми на кафедрі теоретичної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна сформувався власний науковий напрямок дослідження електромагнітних явищ у часовій області. Фундаментальною базою цього напрямку став метод модових розкладань, формалізований наприкінці 80-х років 20-го століття професором О. О. Третьяковим. Цей метод було застосовано як до внутрішніх (резонатори, хвилеводи), так і до зовнішніх задач електродинаміки (хвильові пучки, антени). Особливістю підходу було розкладання розв'язку задачі за системою мод порожнього резонатору, хвилеводу, або вільного

простору. Розвиток методу був продовжений потужною групою молодих вчених – Думіним О.М., Бутримом О.Ю., Джин Юном, Антофесвою М.С., Кочетовим Б.А., Легеньким М.М., які захистили кандидатські дисертації на цій ниві. Так вийшло, що автор цього відгуку був офіційним опонентом на захистах кандидатських дисертацій майже всіх членів цієї команди. Тому можна з впевненістю сказати, що загальним знаменником в цій групі був Бутрим Олександр Юрійович, докторську дисертацію якого ми зараз і розглядаємо. Він є співавтором майже всіх публікацій членів цієї групи дослідників, починаючи з задач щодо поширення імпульсних хвиль та їх дифракції на границях середовищ у хвилеводі, до дослідження коливальних у резонаторі з нестационарним чи диспергуючим середовищем та поширення імпульсних сигналів у діелектричних хвилеводах і конічних лініях, а також у конічних лініях та циліндричних лініях з багатозв'язною областю перетину. Ще в кандидатській дисертації, захищеною Бутримом О.Ю. у 2005 році, було закладено головну ідею, яка значно покращила метод модового базису з точки зору швидкості збіжності модових розкладань для складних поперечно-неоднорідних структур.

Отже, як можна бачити, його участь в дослідженнях фактично сприяла створенню напрямку, у рамках якого метод модового базису був поширений на широке коло задач. В своїй докторській дисертації він узагальнив зазначені результати, виклав методологію методу модового базису для кількох класів задач з факторизованою залежністю параметрів середовища як добутку функції поперечних координат на функцію поздовжньої координати та часу: для закритих циліндричних хвилеводів, для конічних хвилеводів, для відкритих діелектричних хвилеводів. Це дозволило розглянути дуже широке коло задач, виявити та дослідити декілька нових фізичних ефектів. Крім методології методу модового базису, у дисертації також розглянуто кілька актуальних задач магнітокардіографії, практичне значення яких важко переоцінити.

Актуальність проведеного дослідження визначається також тим, що воно проводилось у рамках кількох держбюджетних дослідницьких тем та одного міжнародного проєкту, що виконувались на кафедрі теоретичної радіофізики ХНУ, в яких Бутрим О.Ю. був керівником або відповідальним виконавцем.

Характеристика роботи та новизна отриманих результатів. Дисертація складається зі вступу та шести розділів.

У першому розділі «Огляд літератури та вибір напрямку дослідження» наведено огляд літератури за темою дисертації. Обговорюється розвиток модових методів та методів дослідження електродинамічних задач у часовій області. Визначається проблематика дослідження. Окреслюється коло задач, що підлягають дослідженню. Особливо висвітлюється історія розвитку методу модового базису.

У другому розділі «Метод модового базису у закритих циліндричних хвилеводах» розглянуто методологію застосування методу модового базису до задач збудження та поширення хвиль у циліндричному хвилеводі з неоднорідним заповненням та багатозв'язною областю перетину. Новизна результатів цього розділу полягає в наступному: уперше розглянуто та обґрунтовано розбиття простору розв'язків з урахуванням підпростору TEM-мод, для яких сформульовано граничні задачі, побудовано числову схему розв'язання одержаних зв'язаних еволюційних рівнянь, цю схему застосовано до розв'язання конкретної задачі поширення TEM-хвилі у плоско-паралельному хвилеводі з діелектричним шаром, встановлено швидку збіжність розв'язків, продемонстровано застосовність методу до розв'язання складних задач на прикладі мікросмушкової лінії, для якої числовим методом визначені модові функції.

У третьому розділі «Метод модового базису в конічних хвилеводах» розглядається задача побудови модових розкладань у часовій області на основі неповного розділення змінних у сферичній системі координат, де радіальна координата грає роль поздовжньої координати, а кутові координати є поперечними. Таким чином можна розглядати регулярні лінії, що складаються з кількох ідеально провідних конусів із середовищем між ними,

матеріальні параметри якого описують факторизованою формою добутку функцій від кутових координат та від радіальної координати та часу. Методологія застосування ММБ залишається тією ж: в операторній формі відділяється частина рівнянь Максвелла, що містить кутові похідні та кутові залежності матеріальних параметрів, і для них вводиться відповідний функціональний простір, в якому вони є самоспряженими. Із задачі на власні значення для операторів отримуються моди для розкладання полів. Для аналізу зміни форми модових амплітуд при поширенні імпульсу враховано згасання, що відбувається через збільшення поверхні фронту при поширенні. Наведено розклад функціонального простору розв'язків на підпростори Е-, Н- і Т-хвиль, для кожного з них сформульовано граничні задачі на власні значення. Одержана система еволюційних хвилевідних рівнянь, яка має вид рівнянь Клейна-Гордона-Фока з матричними коефіцієнтами і доданками, що описують міжтипові перетворення і зміну часової форми модових амплітуд при розповсюдженні впродовж радіального напрямку. На основі аналізу розповсюдження імпульсу на простому прикладі випромінювання кільця з током встановлено, що зі збільшенням радіусу кількість мод, що розповсюджуються, збільшується з-за наявності міжмодового зв'язку, що необхідно враховувати в числовій схемі розв'язування. Встановлено обмеження запропонованої схеми аналізом розповсюдження хвиль в околі центру збудження. Це може бути застосовано до аналізу антен з діелектричним заповненням, наприклад, ТЕМ-рупорів з діелектричним заповненням. При цьому кількість мод, які мають бути враховані, визначається кількістю мод, що розповсюджуються при максимальному радіусі, де ще мають місце міжмодові перетворення, тобто на апертурі антени. Далі у вільному просторі моди розповсюджуються окремо одна від одної. Це значить, що вищі моди не зроблять суттєвого внеску у поле, що випромінюється у дальню зону, якщо вони не були збуджені з помітною амплітудою на апертурі.

В четвертому розділі «Метод модового базису у відкритих діелектричних хвилеводах» проаналізовано збудження і розповсюдження імпульсних сигналів у відкритих діелектричних хвилеводах. Особливістю таких структур є неперервний спектр власних значень, що приводить до модових розкладень у виді інтегралів. Одержана система інтегро-диференціальних еволюційних рівнянь, в якій ядра інтегралів описують міжмодові і міжтипові перетворення. На основі методу моментів розроблена числова схема розв'язку системи таких рівнянь. Проведено моделювання розповсюдження імпульсу у відкритому діелектричному хвилеводі і виявлено та проаналізовано нове фізичне явище у виді імпульсної поверхневої хвилі-передвісника, яка розповсюджується вздовж хвилеводу зі швидкістю світла у вільному просторі, зберігаючи при цьому свою просторову структуру. Ця хвиля виникає завдяки заломленню частини випромінювання від джерела під кутами, близькими до кута повного внутрішнього відбиття. Крім того, хвилі від джерела, які пройшли через границю під більшими кутами, формують поле, що випромінюється у вигляді сферичної хвилі. На границі діелектрика цей сферичний фронт переходить в імпульсну поверхневу хвилю, яка формує конічний фронт у глибині діелектрика. Швидкість поширення цього конічного фронту у напрямку, перпендикулярному до нього, дорівнює швидкості світла в діелектрику, швидкість же його розповсюдження вздовж осі хвилеводу дорівнює швидкості світла у вільному просторі. Ефект, схожий на механізм черенковського випромінювання.

У п'ятому розділі «Розв'язання широкосмугових задач дифракції» розглянуто низку задач одномодової дифракції. Розв'язання велось у рамках методу операторів дифракції, що є операторами тилу згортки. Вони пов'язують часові форми хвилі, що падає, з часовими формами хвиль, що пройшли та відбилися. У такій постановці розглянуто задачу про дифракцію імпульсної хвилі на межі двох магніто-діелектричних середовищ із втратами у хвилеводі. Отримано аналітичні вирази для відповідних операторів відбиття та проходження. Досліджено особливі випадки ізоімпадансних та ізорефракційних середовищ, для яких стають нульовими відповідно миттєва та резонансна частини операторів відбиття. За допомогою одержаних аналітичних виразів та (для перевірки)

прямого числового моделювання за методом FDTD, було ретельно досліджено падіння імпульсної E-хвилі на межу провідного середовища у хвилеводі. При цьому поздовжня компонента електричного поля у перетині хвилеводу створює сумарний потік заряду провідності від поверхні у глибину середовища. Було виявлено та пояснено коливання поверхневого та об'ємного зарядів поблизу межі, які виникають при цьому процесі. Зокрема встановлено, що показник згасання цих коливань відповідає втраті енергії поверхневою хвилею на границі провідного середовища.

Для розв'язання більш складних задач багатомодової дифракції у часовій області використано метод узгодження мод, добре відомий у частотній області. Застосування цього методу для аналізу дифракції хвиль на стиках хвилеводів полягає в перерозкладанні полів на спільній апертурі за системами хвиль зліва і справа від апертури. Ця процедура призводить до матричного формулювання граничних умов на стику, яку доповнюють простими умовами для імпедансів мод, що беруть участь у формулюванні, і в результаті отримують матрицю розсіювання. У дисертації застосовано аналогічний метод побудови матриці, що моделює ефект міжмодового зв'язку на неоднорідності. Ця матриця використовується для оновлення модових амплітуд у точці стику у кожний наступний крок моделювання у часі. Таким чином, граничні умови накладаються не на окремі частоти, а у кожен момент часу. Цей метод застосовано до простих структур: стрибку у плоско-паралельному хвилеводі, стику коаксіального та круглого хвилеводів, випромінюванні біконічної антени. У кожному випадку результати моделювання запропонованим методом було порівняно з результатами, що були отримані традиційними методами у часовій (FDTD) чи у частотній (MOM Solver) області, продемонстровано збіжність розв'язків.

Ще однією розглянутою задачею дифракції стала задача про аномальне широкосмугове поглинання у тонкому провіднику при нормальному падінні на нього E-поляризованої хвилі. Аномальність процесу полягає в тому, що перетин поглинання на кілька порядків перевищує геометричні розміри провідника. Точний розв'язок цієї задачі є давно відомим, він легко будується на основі розкладання плоскої хвилі на циліндричні хвилі (функції Бесселя) та накладання граничних умов. Наближену модель запропоновано у вигляді послідовної провідності та індуктивності. Індуктивність нескінченного прямого круглого провідника у статичному наближенні є нескінченною, тому було розраховано залежну від частоти індуктивність у динамічному наближенні з урахуванням запізнення фази магнітного поля, створеного окремими частинами провідника. Така модель пояснює різні режими процесу поглинання (резистивної, індуктивної взаємодії, скін-ефекту). Одержано асимптотики відповідних залежностей фактору поглинання від параметрів задачі — довжини хвилі, радіусу та провідності.

В шостому розділі «Власні моди у задачах просторової фільтрації у мультисенсорних системах» розглянуто задачу побудови методів просторової та часової фільтрації для виділення слабкого сигналу від локального джерела магнітного поля на фоні сильних завад від віддалених джерел при магнітометричних вимірах. Ця задача є актуальною при обробці інформації в магнітокардіографії, де треба визначити дуже слабкий магнітний сигнал від серця людини на фоні набагато сильніших магнітних полів Землі та антропогенних шумів (на кілька порядків). Дослідження цього явища складається з розробки прямих та зворотних методів магнітостатики. Пряма задача розв'язувалась як для вільного простору, так і для моделі торсу та серця як тіл з визначеною провідністю. Для побудови розрахункового алгоритму використовувався відомий метод граничних елементів. Зворотна задача розв'язується на основі методу найменших квадратів, шляхом мінімізації середньоквадратичної розбіжності між модельним та вимірним сигналом. Алгоритми розрахунків засновані на лінійному зв'язку відгуку датчиків з амплітудою точкового джерела магнітного поля. В роботі запропоновані алгоритми так званої просторової фільтрації, які базуються на тому, що корисний сигнал та завади у багатовимірному просторі сигналів (що відповідає векторному сигналу від набору

сенсорів, рознесених у просторі) мають різні матриці коваріації. Проектуванням вимірюного сигналу на підібраний підпростір можна розділити завади від віддалених джерел та сигнал від локального джерела (серця). Для такого розділення було запропоновано два методи, а саме традиційний метод «власних ортогональних мод», що застосовується у статистичній обробці зображень, та метод тейлоровських мод. Перший метод засновано на використанні сингулярного розкладання матриці, що отримана зі стовпців сигналів, для яких треба визначити матрицю коваріації та її головні компоненти (тобто вектори, імовірність вимірювання проекції на які є найбільшою). Другий метод базується на тому, що просторові похідні від магнітних полів, що створює локальне джерело, спадають з відстанню за степеневим законом, який визначається сумарним степенем похідної. Тому запропоновано виділяти підпростори на основі тейлорівських мод, що відповідають тейлорівському розкладанню векторного магнітного поля у степеневі ряди. В роботі проведено порівняння цих двох методів. На завершальному етапі аналізу запропоновано метод нестационарної фільтрації, заснований на тому факті, що ширина спектру широкосмугового кардіосигналу змінюється у часі. Тому можна використовувати амплітудну маску з каналу електрокардіограми, який містить значно менше шумів, для нестационарної фільтрації за допомогою прямого-зворотного віконного перетворення Фур'є сигналів з каналів магнітокардіограми. Такий підхід дає покращення відношення сигнал/шум порівняно з традиційною стаціонарною вінерівською фільтрацією.

Обґрунтованість і достовірність результатів дисертації. Обґрунтованість і достовірність отриманих в дисертації результатів підтверджуються строгим формулюванням задач, вибором строгих методів розв'язання, що базуються на теорії самоспряжених операторів, порівнянням результатів числових експериментів з результатами інших методів, чітким фізичним аналізом результатів, що виявляє механізми досліджуваних процесів.

Науково-практичне значення результатів дисертації. Розроблений у дисертаційній роботі науковий напрямок дозволяє створювати ефективні числово-аналітичні методи розрахунку й аналізу різноманітних процесів збудження, поширення, дифракції та випромінювання імпульсних сигналів у таких структурах. Виявлені при аналізі поширення імпульсної поверхневої хвилі у діелектричному хвилеводі ефекти можуть застосовуватись для створення нового класу резонансних діелектричних пристроїв на основі конічних метало-діелектричних структур, які підтримують резонанс на поверхневій хвилі. Проведений аналіз поведінки імпульсного хвильового фронту під час поширення імпульсного хвильового пучка у вільному просторі може бути застосований для компактного та при цьому достатньо точного представлення полів імпульсних антен у ближній та проміжній зонах. Одержані в аналітичному вигляді у часовій області оператори дифракції на межі середовищ у хвилеводі дозволяють включити цю неоднорідність до числа базових для використання в автоматизованих системах розрахунку хвилевідних вузлів у часовій області. Проведений фізичний аналіз аномального поглинання у тонких провідних дротах дає можливість більш ефективно створювати поглинаючі структури на основі цього ефекту. Наприклад, встановлена залежність поглинання від індуктивності дозволяє пропонувати використання дротів у вигляді гвинтових ліній або біфілярних гвинтових ліній для зниження індуктивності та посилення ефектів поглинання. Розроблені методи просторової та часової фільтрації для магнітокардіографії (МКГ) дозволяють створювати МКГ системи з використанням ферозондових датчиків, які порівняно з надпровідними інтерференційними датчиками є більш дешевими, доступними та здатними працювати при кімнатній температурі, що робить технологію МКГ діагностики більш доступною для клінічної практики.

Повнота висвітлення матеріалів дисертації в опублікованих працях. Наукові положення, висновки та рекомендації дисертації, достатньо повно викладені у 34 статтях у фахових наукових журналах (з них 11 опубліковано у реферованих закордонних журналах, та в 1 розділі монографії) та у 43 публікаціях у реферованих збірках праць наукових конференцій, серед яких 36 є міжнародними. Зміст автореферату є ідентичним положенням дисертації й дозволяє судити про обсяг і якість виконаної дисертантом роботи. В авторефераті не міститься відомостей, які не представлено в дисертації. Результати наукових досліджень, за якими здобувач захистив кандидатську дисертацію, використовувались лише в оглядовій частині і не ввійшли до положень, що виносяться на захист. Новизна результатів у сумісних роботах висвітлена усюди по тексту дисертації, де вони представлені.

Зауваження по дисертації. Робота не позбавлена деяких недоліків:

1. В оглядовому розділі автор згадує про поширення сигналів у хвилеводах з диспергуючим середовищем, але в основній частині дисертації жодних результатів з цього приводу не наводиться. Хотілося б дізнатися, які складнощі виникають при моделюванні методом модового базису таких задач.
2. У підрозділі 2.4 автор отримує модові функції для закритого круглого хвилеводу з діелектричним стержнем та приводить дисперсійні характеристики цього хвилеводу. Зокрема зазначаючи, що у такій структурі можуть існувати комплексні хвилі. Було б важливим показати результати саме імпульсного збудження такої структури та аналіз процесів, що відбуватимуться у часовій області, як саме комплексні хвилі формуватимуть коливання резонаторного типу поблизу джерела. Зокрема імпульсна поверхнева хвиля має збуджуватись і у такій закритій структурі, то ж порівняння особливостей її поширення із випадком відкритого хвилеводу було б також цікавим.
3. Імпульсна поверхнева хвиля, що виникає при поширенні імпульсного сигналу у діелектричному хвилеводі, є, судячи з рисунків, майже періодичною хвилею з визначеним періодом, що залежить від радіуса та діелектричної сталості. На мою думку варто було б дослідити частотний спектр такої хвилі, а також спробувати збудити хвилевід на цій частоті у квазі-гармонічному режимі та з'ясувати швидкість поширення фронту та фази хвилі, що виникатиме.
4. У третьому розділі автор будує метод модового базису для конічних хвилеводів із складним заповненням, але конкретні задачі, що були проаналізовані (випромінювання кільця зі струмом, моди біконічної лінії), не містять власне кутової неоднорідності.
5. На рис. 4.22 наведено розподіл енергії при поширенні вздовж діелектричного хвилеводу імпульсної поверхневої хвилі при її збудженні черенковським джерелом, але подробиці формулювання задачі, часової та просторової функцій збудження не достатньо повно описані у тексті. Не вказано також часові інтервали між кадрами та загальний час моделювання.
6. На рис. 4.23 автором наведено графік розподілу енергії імпульсної поверхневої хвилі вздовж хвилеводу. Було б цікаво оцінити асимптотику згасання цього розподілу у просторі та у часі та запропонувати кількісну модель, що б пояснила її поведінку.
7. У підрозділі 5.2.1 автором отримано досить громіздкі аналітичні формули для операторів відбиття та проходження. Було б доречним провести аналіз цих виразів, зобразити хоча б графічно при деяких параметрах відповідні часові залежності, обговорити їх асимптотичну поведінку тощо.
8. Не обґрунтовано, чому автор у розділі 6.2 моделює та знаходить оптимальні параметри гексагональної решітки сенсорів, а в наступному розділі 6.3 аналізує та вивчає роботу вже прямокутної геометрії решітки.
9. Серед технічних зауважень слід зазначити наявність описок (наприклад, ступеневий ряд замість степенового), написів на рисунках різними мовами (російською, українською (рис. 4.20) або англійською (рис. 4.15-4.17)).

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

Загальний висновок. Дисертаційна робота Бутрима О.Ю. «Застосування модових розкладань у широкосмугових задачах електродинаміки», що подана на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук, вирішує важливу наукову проблему та розвиває новий науковий напрямок дослідження хвилевідних систем з поперечно-неоднорідним заповненням у різноманітних конфігураціях шляхом методу побудови модових розкладань у часовій області на основі часткового розділення змінних у рівняннях Максвелла. Розроблені методи та числові схеми розв'язання застосовано до аналізу багатьох важливих задач, що дозволило дослідити нові фізичні явища та виявити нові фізичні ефекти. Достовірність отриманих результатів не підлягає сумніву. За тематикою проведених досліджень, змістом та отриманими результатами дисертація Бутрима О. Ю. цілком відповідає паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика. Дисертаційна робота в цілому за рівнем, за отриманими результатами, за змістом, обсягом і оформленням задовольняє всім вимогам, які пред'являє ДАК України до докторських дисертацій, а її автор Бутрим Олександр Юрійович безумовно заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент,
завідуючий кафедрою вищої математики
Харківського національного
університету радіоелектроніки,
доктор фізико-математичних наук, професор

Нерух О. Г.

Підпис Неруха Олександра Георгійовича завірять
Вчений секретар ХНУРЕ



Цимбал О.М.