

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені В. Н. КАРАЗІНА

**Бутрим Олександр Юрійович**

УДК 537.87

**ЗАСТОСУВАННЯ МОДОВИХ РОЗКЛАДАНЬ  
У ШИРОКОСМУГОВИХ ЗАДАЧАХ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ**

01.04.03 – радіофізика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:**

доктор фізико-математичних наук, професор

**Колчигін Микола Миколайович,**

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
завідувач кафедри теоретичної радіофізики.

**Офіційні опоненти:**

доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України,

**Мележик Петро Миколайович,**

Інститут радіофізики і електроніки ім. О. Я. Усикова,  
директор;

доктор фізико-математичних наук, професор

**Нерух Олександр Георгійович,**

Харківський національний університет радіоелектроніки,  
завідувач кафедри вищої математики;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,

**Куриляк Дозислав Богданович,**

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,  
завідувач відділу фізичних основ діагностики матеріалів.

Захист відбудеться “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2015 р. о \_\_\_\_ годині

на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02

Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

за адресою: 61022, м. Харків, пл. Свободи 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці

Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

за адресою: 61022, м. Харків, пл. Свободи 4.

Автореферат розісланий “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2015 р.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради

Аркуша Ю. В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Інтерес до задач збудження та поширення нестационарних сигналів в хвилеведучих структурах та у вільному просторі виник ще з другої половини минулого століття у зв'язку з проблематикою захисту радіоелектронної апаратури від впливу електромагнітного імпульсу ядерного вибуху. Ранні роботи з розповсюдження імпульсних сигналів у хвилеводах пов'язані в СРСР перш за все з ім'ям Г. Кісунька, серед закордонних вчених слід відзначити М. Cerillo, G.I. Cohn, M. Cotte, R.S. Elliott, A.E. Karbowski.

Надалі імпульсні та широкополосні сигнали навчилися генерувати й активно використовувати в радіолокації, в основному на невеликих відстанях: підповерхнева локація для пошуку труб, кабелів, мін, боєприпасів, археологічного пошуку, радар для локації крізь стіни, для виявлення людей під завалами, локація крізь листя тощо. Переваги використання таких сигналів в локації обумовлені значним поліпшенням роздільної здатності по дальності, а також можливістю ідентифікації зондуємих об'єктів за їх специфічними резонансами. Імпульсні локатори використовуються також для локації літаків, при цьому вони мають властивості надроздільності за дальністю, що дозволяє спостерігати окремі частини літака, ідентифікувати клас літака, а також виявляти літаки-стелси. Піонером сучасної моди на надширокополосні (НШС) методи слід назвати Н. Ф. Harmuth, потім відзначились D. Ross та K. Robbins, T. Barret. Прикладні дослідження у галузі НШС в пострадянських країнах пов'язані з прізвищами І. Імморєєва, Л. Астаніна, О. Кардо-Сисоева, О. Костильова, В. Кримського, С. Масалова, Г. Почаніна, М. Колчигіна, Б. Левітаса, М. Фінкельштейна та багатьох інших.

У 90-х роках минулого століття інтереси в галузі генерації потужних імпульсних сигналів змістилися з захисту від електромагнітного імпульсу (ЕМІ) в бік штучного створення таких імпульсів для впливу на електронні засоби в якості «електромагнітної зброї», яка здатна на великій відстані від антени виводити з ладу напівпровідникову апаратуру за допомогою електромагнітного імпульсу високої напруженості. Крім того створюються також ЕМІ бомби, які доставляються ближче до супротивника за допомогою снарядів або ракет і генерують ЕМІ в безпосередній близькості від апаратури, на яку необхідно вплинути. З цієї тематики слід відзначити роботи таких вчених, як D. Giri, C. Baum, I. Магда, А. Прищепенко.

З початком 21-го століття значно зріс інтерес до комерційного використання систем зв'язку на імпульсних сигналах. Це зумовлено, в першу чергу, введенням стандарту Американською комісією зв'язку (FCC), яка дозволила вільне використання надширокополосних сигналів із заданим обмеженням на спектральну густину енергії випромінюваних імпульсів у смузі частот 0,5-10 ГГц. Іншим стимулом стало створення адекватної елементної бази, зокрема, генераторів імпульсів, які дозволяють синтезувати форму імпульсів пікосекундної тривалості. У результаті широкополосні сигнали зайняли важливе місце в техніці зв'язку, де використання широкої смуги дає такі переваги, як висока швидкість передачі даних, захищеність від завад, прихований зв'язок – коли ефірні канали зв'язку важко виявити через розподіл енергії по широкій смузі частот та використання шумоподібних сигналів. Імпульсні системи зв'язку не порушують роботу звичайних вузькополосних систем, забезпечують більш високу щільність радіоканалів та є більш пристосованими до передачі цифрових сигналів.

Важливою проблемою електродинаміки нестационарних сигналів є вивчення та розрахунок проходження надкоротких імпульсів в неоднорідних середовищах, зокрема в неоднорідних хвилеводах. Ця проблема безпосередньо пов'язана з питаннями впливу потужних коротких імпульсів на радіоелектронну апаратуру, адже радіотехнічні пристрої пов'язані з зовнішнім середовищем через хвилевідні тракти з різними неоднорідностями. Крім того, значне поширення знайшли друковані пристрої НВЧ, такі як мікросмужкові лінії, щільні лінії тощо. Всі вони являють собою квазі-ТЕМ лінії, в яких існує основна мода, яка не має частоти відсічки, і тому здатна без істотних спотворень передавати імпульсні сигнали, в тому числі такі, що мають спектральну складову поблизу нульової частоти, наприклад, гаусівський імпульс. Однак приставка квазі- у назві підкреслює, що властивості таких мод відрізняються від ТЕМ-мод, які не мають дисперсії. Застосування методів розрахунку, що базуються на використанні перетворення Фур'є, в даному випадку призводить до значних труднощів обчислювального характеру, тому що у лініях з неоднорідним в поперечному перетині розподілом діелектрика (як це має місце в друкованих лініях) від частоти залежить не тільки постійна поширення, але й модова конфігурація електромагнітного поля. У такому випадку використання модового підходу, традиційно застосовуваного в частотній області (ЧО), вимагає розв'язання задачі щодо визначення власних мод на кожній частоті спектральної смуги сигналу. Тому подібні завдання в даний час вирішуються з використанням методів у часовій області. Оскільки точних аналітичних розв'язань для більшості практичних задач не існує, доводиться застосовувати різні числові методи.

Найбільш поширеним та універсальним на сьогоднішній день в цій галузі є метод скінченних різниць у часовій області (FDTD) та різноманітні його модифікації, такі як метод скінченних об'ємів (FVTD), псевдоспектральний метод (PSTD) тощо. Ці методи засновані на дискретизації рівнянь Максвелла в диференціальній (FDTD, PSTD) або інтегральній (FVTD) формі на регулярній (FDTD, PSTD) або нерегулярній (FVTD, mapped PSTD, multi-domain Chebyshev PSTD) сітці. Однак застосування цих методів для розв'язання задач з різко неоднорідними середовищами призводить до необхідності використовувати досить густу сітку за координатами (15-20 точок на довжину хвилі найбільш високочастотної складової сигналу в середовищі з найбільшою діелектричною проникністю, або більше, якщо необхідно точно врахувати дрібні неоднорідності, складні ребра, кути тощо). Найкращі реалізації цього методу (PSTD) вимагають дискретизації 2-3 точок на довжину хвилі в однорідному середовищі. Однак, в неоднорідному хвилеводі імпульсний сигнал призводить до збудження багатьох гармонік поля, тому необхідно використовувати досить густу сітку в поперечній площині. У випадку псевдоспектральних методів наявність висококонтрастних меж є причиною поганої збіжності розв'язків. Це значно збільшує вимоги до розмірів пам'яті, призводить до накопичення помилок і зайвих обчислювальних витрат, не дозволяє проводити якісний аналіз процесів, вивчати загальні механізми явища в цілому. Таким чином, ця область залишається **недостатньо дослідженою**. Серед вчених, що внесли значний внесок у розвиток згаданих обчислювальних методів слід згадати піонерську роботу К. Уєе, який започаткував метод FDTD, огляд сучасного стану цих методів можна знайти у майже канонічних книгах А. Taflove, серед українських вчених слід відзначити роботи школи Ю. Сіренка.

Крім суто числових методів можна згадати й аналітико-числові методи на основі методу інтегральних рівнянь Вольтерра, що розробляються у Харкові під керівництвом О. Неруха та Н. Сахненко. Ці роботи більше пов'язані з дослідженням поведінки імпульсних сигналів за наявності нестационарних середовищ.

Цікавість до аналітичних методів дослідження поширення імпульсів у хвилеводах відновила у 1990-х роках, що пов'язано з прізвищами В. Борисова, А. Шварцбурга, G. Kristensson, W. Geyi. Випромінювання та поширення імпульсів у вільному просторі аналітичними методами досліджували А. Shlivinski, E. Heyman, R.W. Ziolkowski, A. Yarovoy, C. Baum, I. Зернов, Я. Пустовой, Л. Содін, В. Лісіцин та інших.

Харківську школу аналітичних методів дослідження хвилевідних та резонаторних задач у часовій області започаткував О. Третяков. Він у 1986 р. і запропонував підхід, що був умовно названий методом модового базису (ММБ). Крім того слід зазначити роботи О. Шматька та З. Назирова щодо ММБ для резонаторів з неоднорідним заповненням. Головною проблемою ММБ у початковому формулюванні було, те, що для розкладання полів пропонувалось використовувати систему мод порожнього хвилеводу. Тому за наявності неоднорідного діелектрика мали відбуватись значні міжмодові перетворення, бо окремі моди не задовольняли граничним умовам на межах діелектриків, що призводило б до повільної збіжності розв'язку. Зазначену проблему було подолано автором дисертації в ранніх роботах за допомогою включення параметрів поперечно неоднорідного середовища в задачу на визначення базису таким чином, щоб одержати самоспряжений оператор, який би давав повний спектр ортогональних (та біортогональних) мод для розкладання полів. Але це було зроблено лише для найпростішого випадку циліндричних хвилеводів з однозв'язною областю перетину. Порівняно з зазначеними ранніми роботами в рамках ММБ у цій дисертації запропоновано узагальнення методу на значно ширше коло проблем: розглянуто задачі в циліндричній системі координат (закриті хвилеводи з багатозв'язною областю поперечного перетину та з поперечно-неоднорідним заповненням діелектриком, відкритий простір – поширення імпульсних пучків, відкриті діелектричні хвилеводи) і в сферичній системі координат (конічні хвилеводи з багатозв'язною областю поперечного перетину та з азимутально-неоднорідним заповненням, поширення сферичних гармонік у вільному просторі). Крім того, запропоновано метод узгодження мод для розв'язання задач багатомодової дифракції у часовій області. Розглянуто низку задач одномодової дифракції на межах середовищ у хвилеводах у більш загальній постановці. Задачі збудження різноманітних конічних структур, у тому числі імпульсами, в Україні розглядалися в роботах В. Сологуба, В. Дорошенка, З. Назарчука та Д. Куриляка. Метод узгодження мод був останнім часом ретельно досліджений І. Петрусенко та Ю. Сіренко.

Крім проблем, пов'язаних з поширенням імпульсів, розглянуто також задачі просторової фільтрації в багатосенсорних вимірювальних системах. Актуальність цього кола проблем визначається необхідністю фільтрації надслабких сигналів від серця пацієнта на тлі сильних зовнішніх завад в магнітокардіографічних вимірювальних системах. Серед робіт світових вчених у напрямку просторової фільтрації слід відзначити К. Sekihara, S. Nagarajana. Методи часо-частотного дослідження НШС сигналів в Україні розроблялись в роботах Л. Чорногора та О. Лазоренка.



**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота була виконана у відповідності до плану науково-дослідних робіт Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна в рамках держбюджетних тем: «Тривимірне моделювання розсіяння надширококутних електромагнітних сигналів на об'єктах, які розташовані у неоднорідних середовищах, з метою розв'язання засобів для дослідження складних середовищ» (номер держреєстрації 0104U000674), «Створення нових моделей поширення імпульсів у лініях передачі та розробка нових випромінювачів імпульсних сигналів для систем зондування та зв'язку» (номер держреєстрації 0106U001546), «Розробка та моделювання нових засобів формування спрямованого випромінювання надкоротких імпульсних сигналів» (номер держреєстрації 0107U000692), «Дослідження поширення та випромінювання імпульсів у відкритих та конічних хвилеводах і хвилеводах з дисперсним середовищем» (номер держреєстрації 0109U000541), «Дослідження нестационарного та резонансного випромінювання електрично малих TEM антен» (номер держреєстрації 0110U001426), «Дослідження взаємодії електромагнітних імпульсних сигналів з диспергуючим середовищем» (номер держреєстрації 0112U000562), «Надширококутні випромінювачі та поглиначі на основі неоднорідних TEM-рупорів та резистивних структур» (номер держреєстрації 0112U005890). Автор був відповідальним виконавцем або керівником зазначених робіт. Робота також частково пов'язана з виконанням міжнародного конкурсного проекту в рамках співробітництва ХНУ з закордонними партнерами, в якому автор був виконавцем: 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.

**Мета і задачі дослідження.** *Метою роботи* є розвиток існуючих і створення нових обчислювальних і аналітичних методів на основі модових розкладань у часовій області, а також їх застосування до вивчення фізичних закономірностей збудження, поширення, дифракції та випромінювання імпульсних сигналів у різноманітних регулярних хвилеведучих структурах.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі *задачі*:

1. Узагальнити метод модового базису на циліндричні хвилеводи з багатозв'язною областю поперечного перетину при факторизованій залежності параметрів середовища від поперечних координат і від поздовжньої координати та часу. Одержати систему зв'язаних еволюційних рівнянь для модових амплітуд. Вивчити властивості матричних коефіцієнтів рівнянь. Розробити числову схему розв'язання отриманих рівнянь. Верифікувати розв'язок, провівши числове моделювання та порівнюючи з результатами методу скінченних різниць (FDTD). Вивчити збіжність модового розкладання для сигналів з обмеженим спектром.
2. Узагальнити метод модового базису на конічні хвилеводи з багатозв'язною областю поперечного перетину при факторизованій залежності параметрів середовища від кутових координат і від радіальної координати та часу. Одержати систему зв'язаних еволюційних рівнянь для модових амплітуд. Розробити числову схему розв'язання отриманих рівнянь. Вивчити властивості матричних коефіцієнтів рівнянь. Вивчити збіжність модового розкладання.

3. За допомогою методу модового базису промоделювати збудження та поширення імпульсних хвильових пучків, дослідити характеристики кривизни та загасання нестационарного хвильового фронту, їх еволюцію при поширенні.
4. Узагальнити метод модового базису на відкриті діелектричні хвилеводи. Отримати систему зв'язаних інтегро-диференціальних еволюційних рівнянь для модових амплітуд. Розробити числову схему розв'язання отриманих рівнянь. Верифікувати розв'язок, провівши числове моделювання та порівнюючи з результатами моделювання за допомогою методу скінченних різниць для тіл обертання (BOR-FDTD) з супроводжувачим вікном.
5. Виявити та дослідити фізичні ефекти й особливості поведінки полів, що виникають при поширенні імпульсних сигналів у відкритих діелектричних хвилеводах.
6. Розробити числову схему розв'язання задач хвилеводної дифракції на основі застосування методу модового базису та метода узгодження мод безпосередньо у часовій області. Провести верифікацію отриманої схеми за допомогою порівняння з результатами FDTD моделювання на кількох типових задачах дифракції на стиках хвилеводів у циліндричній і конічній геометрії, зокрема для базових конфігурацій імпульсних антен.
7. Отримати аналітичний розв'язок у вигляді операторів дифракції у часовій області для найбільш загальної постановки задачі про дифракцію імпульсної хвилі на межі середовищ у хвилеводі. Вивчити фізичні явища, які відбуваються при падінні імпульсної E-хвилі на межу провідного середовища в хвилеводі.
8. Дослідити фізичні механізми процесу аномального широкосмугового поглинання в тонких провідних циліндрах (дротах).
9. Розробити методи просторової та часової фільтрації для розв'язання задачі виділення слабкого сигналу від локального джерела магнітного поля на тлі сильних завад від віддалених джерел при магнітометричних вимірах. Провести числове моделювання та визначити оптимальні параметри вимірювальної системи та методи виділення корисного сигналу.

**Об'єктом дослідження** є процес збудження, поширення, дифракції та випромінювання імпульсних електромагнітних сигналів.

**Предметом дослідження** є характеристики нестационарного електромагнітного поля у різноманітних хвилевідних структурах та у вільному просторі, фізичні особливості досліджуваних хвилевих процесів.

**Методи дослідження.** Основним методом дослідження є розвинутий автором метод модового базису, що базується на методі неповного розділення змінних. Для побудови й обґрунтування повноти базису використовувалися методи функціонального аналізу: самоспряжені оператори, біортогональні базиси тощо. Аналітичні результати для операторів дифракції було одержано за допомогою методу перетворення Лапласа. Для верифікації результатів використовувався метод скінченних різниць у часовій області (FDTD), зокрема його модифікація для вісесиметричних структур (BOR-FDTD) із застосуванням супроводжувачого вікна. Для аналізу простору сигналів у мультисенсорних системах використовувався також метод власних ортогональних мод, що базується на сингулярному розкладанні матриць.

**Наукова новизна одержаних результатів** визначається наступним:

- Удосконалено метод модового базису для закритих циліндричних хвилеводів: модове розкладання узагальнено на випадок хвилеводів з багатозв'язною областю поперечного перетину та факторизованою залежністю матеріальних параметрів середовища. Це дозволило ефективно розглядати поширення імпульсів в актуальному класі ліній передачі з квазі-ТЕМ хвилями (такими як екрановані мікросмужкові та щілинні лінії на діелектричних підкладках). Розроблено числову схему розв'язання одержаних еволюційних хвилевідних рівнянь. Встановлено швидку збіжність модових розкладань для сигналів з обмеженою спектральною смугою.
- Уперше побудовано метод модового базису для конічних хвилеводів з багатозв'язною областю поперечного перетину та факторизованою залежністю матеріальних параметрів середовища. Одержано та проаналізовано систему еволюційних хвилевідних рівнянь для цього випадку.
- Уперше побудовано метод модового базису для аналізу збудження та поширення імпульсних сигналів у відкритих діелектричних хвилеводах. Отримано та проаналізовано систему інтегро-диференціальних еволюційних хвилевідних рівнянь для цього випадку. Розроблено числову схему її розв'язання, яку застосовано для аналізу збудження та поширення імпульсних сигналів у відкритих діелектричних хвилеводах.
- Уперше в результаті числового моделювання у часовій області процесу збудження та поширення імпульсного сигналу у відкритому діелектричному хвилеводі виявлено та проаналізовано нове фізичне явище у вигляді імпульсної поверхневої хвилі-передвісника, яка поширюється вздовж хвилеводу зі швидкістю світла у вільному просторі, зберігаючи свою просторову структуру при поширенні.
- Уперше на основі аналізу поведінки кривизни імпульсного хвильового пучка, за аналогією з відомим у частотній області поняттям фазового центру, запропоновано поняття окремих амплітудного та часового центру для адекватного опису поведінки імпульсних полів у проміжній зоні імпульсних антен. З погляду запропонованої моделі визначено особливості поведінки імпульсного хвильового пучка, що утворюється розподілом струмів на площині, які полягають у формуванні амплітудного центру позаду від площини збудження, а часовий центр встановлюється на відстані кількох поперечних розмірів пучка попереду.
- Уперше отримано в явному вигляді вирази у часовій області для операторів дифракції на плоскій межі розділу магніто-діелектриків із провідністю у хвилеводі.
- Уперше проаналізовано фізичні ефекти, які виникають при падінні імпульсної Е-хвилі на межу провідного середовища у хвилеводі. Виявлено та пояснено коливання поверхневого та об'ємного зарядів поблизу межі, які виникають при цьому процесі: за швидкістю згасання ці коливання пов'язано з поверхневою хвилею, що збуджується на межі провідного середовища.
- Уперше запропоновано числово-аналітичний метод розв'язання задач хвилевідної дифракції на основі модових перерозкладань безпосередньо у часовій області. На основі такого підходу проаналізовано імпульсне випромінювання кількох базових конфігурацій імпульсних антен.
- Уперше проведено фізичний аналіз аномального поглинання у тонких провідних дротах, коли перетин поглинання на кілька порядків перевищує діаметр дроту. У



результаті запропоновано та проаналізовано адекватну фізичну модель, що пояснює різні режими процесу поглинання (резистивної, індуктивної взаємодії, скін-ефекту). Одержано асимптотики відповідних залежностей фактору поглинання від параметрів задачі – довжини хвилі, радіусу та провідності дроту.

- На основі розкладань полів за тейлорівськими модами запропоновано нові методи просторової фільтрації для розв'язання зворотних задач магнітостатики при вимірюванні полів від локальних джерел за допомогою решітки датчиків за наявності сильних віддалених джерел завад. На основі числового моделювання вперше проведено порівняння та виявлено найбільш ефективні методи фільтрації та конфігурації магнітокардіографічної вимірювальної системи із врахуванням неідеальності датчиків, надано рекомендації щодо створення відповідної системи.
- Метод частотної фільтрації сигналів за умови наявності апріорної оцінки спектру сигналу був удосконалений за рахунок нестационарності фільтрації, коли спектральна функція фільтру змінюється у часі та накладається на віконне перетворення Фур'є сигналу, що фільтрується. Продемонстровано ефективність такого підходу на прикладі кардіосигналів у магнітокардіографії.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

- Розроблений у дисертаційній роботі науковий напрямок, що базується на методі модового базису для поперечно-неоднорідних хвилеводів у циліндричній та конічній геометрії, дозволяє створювати ефективні числово-аналітичні методи розрахунку й аналізу різноманітних процесів збудження, поширення та дифракції/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 пучку 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.

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні положення та результати дисертації розроблено автором самостійно. З робіт, опублікованих у співавторстві, в дисертації використано лише ті матеріали, які отримано автором особисто або у одержанні яких автор брав безпосередню участь. А саме, у роботах [1, 5, 6, 7, 8, 14, 15, 30, 33, 41, 52, 66, 69] автором запропоновано методи розв'язання зворотної задачі магнітостатики, методи просторової фільтрації на основі розділення підпросторів методом власних мод і методом тейлорівських мод, проведено обговорення результатів та формулювання висновків, частина моделювання та числових розрахунків; у роботах [3, 4, 27, 64] автором проведено розрахунки, інтерпретація процесів у резистивних навантаженнях та імпульсних характеристик антен; у роботах [20, 45, 54, 70] автором проведено теоретичну інтерпретацію процесів поглинання у тонких дротах, частину моделювання, що була використана для порівняння з результатами експериментів; у роботах [29, 34, 63, 71] автору належить модель опису імпульсного хвильового фронту антени у ближній та проміжній зонах, постановка задачі, частина числових розрахунків, інтерпретація результатів; у роботах [13, 25, 37, 42] автором запропоновано модель матеріальних параметрів середовища та метод її числового моделювання, вибір параметрів для моделювання подвійно від'ємного середовища, інтерпретація головних результатів; у роботах [2, 10, 11, 16, 23, 31, 36, 39, 43, 47, 55, 67, 72, 73, 75, 76] автор формулював задачу, одержав значну частину аналітичних результатів, пропонував числові схеми, проводив інтерпретацію результатів та формулювання висновків; у роботах [9, 12, 17, 18, 19, 21, 22, 24, 26, 28, 32, 35, 38, 40, 44, 46, 48, 50, 51, 53, 57-62, 68, 74, 77] автор ставив задачі, пропонував числові схеми, проводив фізичний аналіз результатів моделювання, опис та інтерпретацію виявлених фізичних процесів; у роботі [65] автору належить ідея виокремлення оператора для факторизованої залежності параметрів середовища.

**Апробація результатів роботи.** Результати роботи доповідались та обговорювались на 17 міжнародних конференціях і симпозіумах:

- 3<sup>rd</sup> International Conference on “Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals” (UWBUSIS'06), Sevastopol (Ukraine), September 18-22, 2006
- First European Conference on “Antennas and Propagation” (EuCAP'06), Nice (France), November 6-10, 2006
- 6<sup>th</sup> International Kharkov Symposium on “Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves” (MSMW'07), Kharkov (Ukraine), June 25-30, 2007
- 6<sup>th</sup> International Conference on “Antenna Theory and Techniques” (ICATT'07), Sevastopol (Ukraine), September 17-21, 2007
- 12<sup>th</sup> International Conference on “Mathematical Methods in Electromagnetic Theory” (MMET'08), Odessa (Ukraine), June 29 - July 2, 2008.
- 4<sup>th</sup> International Conference on “Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals” (UWBUSIS'08), Sevastopol (Ukraine), September 15-19, 2008
- 2008 Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS'08). – Kiev (Ukraine), September 22-24, 2008.
- 3<sup>rd</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2009), Berlin (Germany), March 23-27, 2009.

- International Kharkov Symposium on “Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves” (MSMW’2010), Kharkov (Ukraine), June 21-26, 2010.
- International Conference on “Mathematical Methods in Electromagnetic Theory” (MMET’2010), Kyiv (Ukraine), September 6-8, 2010.
- 5<sup>th</sup> International Conference on “Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals” (UWBUSIS’2010), Sevastopol (Ukraine), September 6-10, 2010.
- International Conference on “Mathematical Methods in Electromagnetic Theory” (MMET’12), Kharkiv (Ukraine), August 28-30, 2012.
- 6<sup>th</sup> International Conference on “Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals” (UWBUSIS’12), Sevastopol (Ukraine), September 17-21, 2012.
- The Eighth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW’2013) and Workshop on Terahertz Technologies (TERATECH’2013), Kharkov (Ukraine), June 23-28, 2013.
- IX International Conference on “Antenna Theory and Techniques” (ICATT’13), Odesa (Ukraine), September 16-20, 2013.
- 15<sup>th</sup> International Conference on “Mathematical Methods in Electromagnetic Theory” (MMET’14), Dnipropetrovsk (Ukraine), August 26-28, 2014.
- 7<sup>th</sup> International Conference on “Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals” (UWBUSIS’14), Kharkiv (Ukraine), September 15-19, 2014.

**Публікації за темою дисертації.** Результати дисертації опубліковано у 77 наукових працях, у тому числі: в 26 основних статтях у фахових журналах (з них 11 опубліковано у реферованих закордонних журналах, та в 1 розділі монографії), у 8 додаткових статтях у фахових журналах, у 36 публікаціях у реферованих збірках праць міжнародних конференцій та у 7 публікаціях у збірках праць українських конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації — 320 сторінок, з них основного тексту — 285 сторінок. Список використаних джерел на 30 сторінках нараховує 302 найменування. Усього в дисертації 65 рисунків та 2 таблиці, з яких 25 рисунків на 12 сторінках повністю займають всю площу сторінки.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** висвітлено актуальність теми дослідження та обґрунтовано необхідність виконання роботи, її зв'язок з науковими програмами, визначено мету та задачі дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, перелічено використані при його проведенні методи, наведено дані про апробацію, висвітлено особистий внесок автора в публікаціях, сформульовано одержані нові результати та висвітлено їх практичне значення.

**Розділ 1 «Огляд літератури та вибір напрямку дослідження»** присвячений огляду літератури за темою дисертації. Розглянуто методи розв'язання задач поширення імпульсних сигналів у лініях передачі. Обговорено як методи аналізу у частотній області, так і у часовій. Зокрема, з'ясовано розбіжності між поняттями мод у частотній області та «модами», що введені у часовій області в якості функцій розкладання. Розглянуті аналітичні та числові методи дослідження поширення імпульсів

у різноманітних хвилеведучих структурах. Висвітлено переваги та недоліки різних методів. Особливу увагу приділено методу модового базису, описано історію його розвитку. Визначено коло питань, що потребує дослідження, та проблеми, які потрібно вирішити. Обґрунтовано вибір методу дослідження, його очікувані переваги. Додатково стисло викладено особливості застосування методу модового базису до аналізу електромагнітних коливань у резонаторах з дисперсними та нестационарними середовищами, зокрема моделі електромагнітних властивостей диспергуючих середовищ, що є придатними до використання у часовій області.

**Розділ 2 «Метод модового базису у закритих циліндричних хвилеводах»** присвячено отриманню системи еволюційних рівнянь, що описують збудження та поширення нестационарних електромагнітних хвиль у неоднорідному хвилеводі з факторизованою залежністю матеріальних параметрів середовища від поперечних координат та від поздовжньої та часової координати такого вигляду:

$$\varepsilon(\vec{r}, t) = \varepsilon_{\perp}(x, y) \varepsilon_{\parallel}(z, t), \quad \mu(\vec{r}, t) = \mu_{\perp}(x, y) \mu_{\parallel}(z, t). \quad (1)$$

Для повноти викладу, наводиться огляд попередніх робіт автора, в яких було проведено часткове розділення координат у рівняннях Максвела, виділено оператори диференціювання за поперечними координатами, до яких ввійшли функції розподілу матеріальних параметрів у поперечній площині  $\varepsilon_{\perp}, \mu_{\perp}$ . Введено функціональний простір, в якому ці оператори є самоспряженими. Сформульовано задачу на визначення їх власних функцій. Цю задачу скаляризовано, як наслідок, одержано скалярні базисні функції, які задовольняють умовам біортогональності. Побудовано базис Е- та Н- мод для розкладання полів у хвилеводі. Недослідженим був перетин ануляторів цих операторів, було лише показано, що для хвилеводів з однозв'язним перетином, він є порожнім, що обмежувало область застосування методу.

У порівнянні з описаними попередніми роботами автора, було проведено подальше узагальнення ММБ на випадок, коли перетин хвилеводу може бути багатозв'язною областю. У цьому випадку існуватиме скінченна кількість ТЕМ-мод, що взаємодіють з іншими модами. Для поперечного перетину  $S$ , що обмежений  $N$  контурами  $L_j$ , ставляться дві задачі з неоднорідними умовами Діріхле на контурах:

$$\begin{cases} \nabla_{\perp} \cdot \varepsilon_{\perp} \nabla_{\perp} \Phi_k^T = 0, \\ \Phi_k^T|_{L_j} = c_k^j \end{cases}, \quad \begin{cases} \nabla_{\perp} \cdot \mu_{\perp}^{-1} \nabla_{\perp} \Psi_k^T = 0, \\ \Psi_k^T|_{L_j} = d_k^j \end{cases}, \quad (2)$$

де  $c_k^j$  та  $d_k^j$  – довільні константи на  $j$ -ом контурі  $L_j$ . Для отримання  $N-1$  лінійно незалежного розв'язку зручно взяти  $c_k^N = 0$ ,  $c_k^j = \delta_{kj}$  для  $k, j = \overline{1, N-1}$  та аналогічно для  $d_k^j$ . Векторні модові функції визначаються через знайдені у цих задачах скалярні потенціали наступним чином:

$$\vec{E}_k^T = \nabla_{\perp} \Phi_k^T, \quad \vec{H}_k^T = [\vec{z}_0 \times \mu_{\perp}^{-1} \nabla_{\perp} \Psi_k^T]. \quad (3)$$

Ці моди доповнюють одержану раніше систему Е-(ТМ-) та Н-(ТЕ-) мод ТЕМ-модами та утворюють разом повний базис у просторі розв'язків. Поля у хвилеводі можуть бути представлені як модові розкладання за цією системою базисних функцій:



$$\begin{aligned}
\varepsilon_0^{1/2} \vec{E}(\vec{r}_\perp, z, t) &= \sum_m v_m^h(z, t) \vec{E}_m^h(\vec{r}_\perp) + \sum_n v_n^e(z, t) \vec{E}_n^e(\vec{r}_\perp) + \sum_k v_k^t(z, t) \vec{E}_k^t(\vec{r}_\perp), \\
\mu_0^{1/2} \vec{H}(\vec{r}_\perp, z, t) &= \sum_m i_m^h(z, t) \vec{H}_m^h(\vec{r}_\perp) + \sum_n i_n^e(z, t) \vec{H}_n^e(\vec{r}_\perp) + \sum_k i_k^t(z, t) \vec{H}_k^t(\vec{r}_\perp), \\
\varepsilon_0^{1/2} E_z(\vec{r}_\perp, z, t) &= \sum_n e_n^z(z, t) q_n \Phi_n^e(\vec{r}_\perp), \quad \mu_0^{1/2} H_z(\vec{r}_\perp, z, t) = \sum_m h_m^z(z, t) p_m \Phi_m^h(\vec{r}_\perp),
\end{aligned} \tag{4}$$

де індекси  $h, e, t$  відповідають Н-(ТЕ-), Е-(ТМ-) та ТЕМ-модам. Модові амплітуди  $i(z, t)$ ,  $v(z, t)$ ,  $h^z(z, t)$  та  $e^z(z, t)$  відповідають розкладанням поперечних компонентів магнітного та електричного поля у Е-, Н- та Т- хвилі, та розкладанням поздовжніх компонент відповідних полів для Н- та Е- хвиль. Якщо підставити ці розкладання в операторну форму рівнянь Максвелла, скористатись тим, що базисні функції є власними функціями часткових операторів, та спроектувати одержані рівняння на ту ж систему базисних функцій, то можна отримати систему еволюційних рівнянь (СЕР). Вона описує зміну модових амплітуд з поширенням в напрямку повздовжньої координати та із часом. Для поперечних модових амплітуд ця система має вигляд:

$$\begin{aligned}
\partial_z \mu_\parallel \left\{ \partial_\tau (\varepsilon_\parallel \mathbf{v}^h) + \mathbf{L}^{hh} \cdot \partial_z \mathbf{i}^h + \mathbf{L}^{he} \cdot \partial_z \mathbf{i}^e + \mathbf{L}^{ht} \cdot \partial_z \mathbf{i}^t \right\} - \mu_\parallel \mathbf{P}^2 \cdot \mathbf{i}^h &= \mathbf{s}_1, \\
\partial_z \varepsilon_\parallel \left\{ \partial_\tau (\mu_\parallel \mathbf{i}^e) + (\mathbf{L}^{he})^T \cdot \partial_z \mathbf{v}^h + (\mathbf{L}^{ee})^T \cdot \partial_z \mathbf{v}^e + (\mathbf{L}^{te})^T \cdot \partial_z \mathbf{v}^t \right\} - \varepsilon_\parallel \mathbf{Q}^2 \cdot \mathbf{v}^e &= \mathbf{s}_2, \\
\partial_\tau \mu_\parallel \left\{ \partial_z \mathbf{i}^h + (\mathbf{K}^{hh})^T \cdot \partial_\tau (\varepsilon_\parallel \mathbf{v}^h) + (\mathbf{K}^{eh})^T \cdot \partial_\tau (\varepsilon_\parallel \mathbf{v}^e) + (\mathbf{K}^{th})^T \cdot \partial_\tau (\varepsilon_\parallel \mathbf{v}^t) \right\} + \mathbf{P}^2 \cdot \mathbf{v}^h &= \mathbf{s}_3, \\
\partial_\tau \varepsilon_\parallel \left\{ \partial_z \mathbf{v}^e + \mathbf{K}^{eh} \cdot \partial_\tau (\mu_\parallel \mathbf{i}^h) + \mathbf{K}^{ee} \cdot \partial_\tau (\mu_\parallel \mathbf{i}^e) + \mathbf{K}^{et} \cdot \partial_\tau (\mu_\parallel \mathbf{i}^t) \right\} + \mathbf{Q}^2 \cdot \mathbf{i}^e &= \mathbf{s}_4.
\end{aligned} \tag{5}$$

Для скорочення запису сум використано матричні позначення:  $(\mathbf{L}^{he} \cdot \partial_z \mathbf{i}^e)_m = \sum_{m'} L_{mm'}^{he} \partial_z i_{m'}^e$ ,  $(\mathbf{P}^2 \cdot \mathbf{i}^h)_m = p_m^2 i_m^h$ . Праві частини рівнянь містять проекції

функцій джерел на елементи базису. Матричні коефіцієнти визначаються формулами:

$$\begin{aligned}
L_{mn}^{ab} &= \frac{1}{S} \int \vec{z}_0 \cdot [\vec{E}_m^a \times \vec{H}_n^b] dS, \\
K_{mn}^{ab} &= \frac{1}{S} \int \varepsilon_\perp \mu_\perp \vec{z}_0 \cdot [\vec{E}_m^a \times \vec{H}_n^b] dS, \quad a, b \in \{h, e, t\}.
\end{aligned} \tag{6}$$

Кілька матричних коефіцієнтів виявляються тотожно нульовими матрицями:  $\mathbf{L}^{et} = \mathbf{L}^{th} = \mathbf{L}^{eh} = \mathbf{K}^{te} = \mathbf{K}^{ht} = \mathbf{K}^{he} = \mathbf{0}$ . Для решти доведено наступні співвідношення:

$$\sum_A \mathbf{K}^{BA} (\mathbf{L}^{CA})^T = \sum_A (\mathbf{L}^{AB})^T \mathbf{K}^{AC} = \sum_A (\mathbf{K}^{AB})^T \mathbf{L}^{AC} = \sum_A \mathbf{L}^{BA} (\mathbf{K}^{CA})^T = \begin{cases} \mathbf{0}, & B \neq C \\ \mathbf{I}, & B = C \end{cases}, \tag{7}$$

де індекси  $A, B, C$  беруться з набору  $\{h, e, t\}$ ,  $\mathbf{L}^T$  означає транспонування  $\mathbf{L}$ . Наприклад, ці формули дають  $\mathbf{L}^{AA} (\mathbf{K}^{AA})^T = \mathbf{K}^{AA} (\mathbf{L}^{AA})^T = (\mathbf{K}^{AA})^T \mathbf{L}^{AA} = (\mathbf{L}^{AA})^T \mathbf{K}^{AA} = \mathbf{I}$ . Доведені властивості коефіцієнтів було використано для побудови явної числової схеми розв'язку еволюційних рівнянь на основі методу скінченних різниць у часовій області (FDTD). Для цього часову похідну слід виразити у явному вигляді через решту доданків. Для прикладу, при розгляді задачі поширення імпульсу у плоско-паралельному хвилеводі з шаром діелектрику вздовж стінки хвилеводу (див. рис. 1)



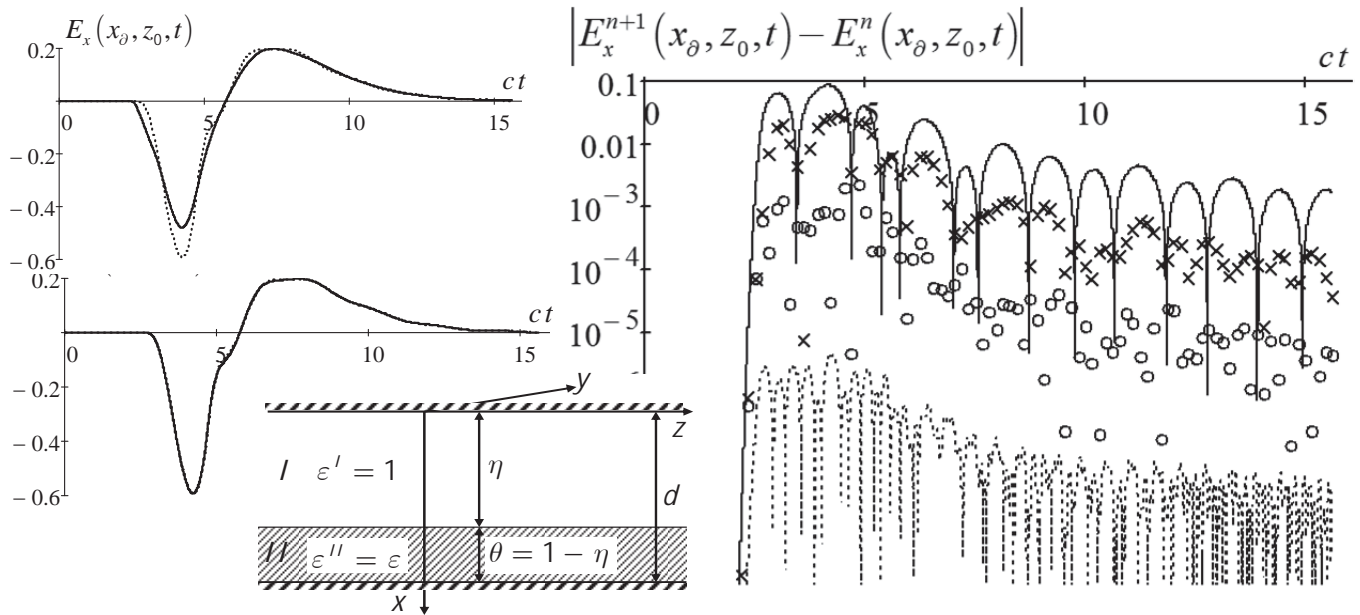
маємо лише одну TEM-хвилю, що пов'язана при поширенні з E-хвилями (H-хвилі поширюються незалежно). Тоді явна числова схема може бути отримана після приведення системи рівнянь до вигляду з явною часовою похідною:

$$\begin{aligned}\partial_{\tau\tau}^2 \mathbf{v}^e &= \mathbf{L}^{ee} (\mathbf{L}^{ee})^T \partial_{zz}^2 \mathbf{v}^e - \mathbf{L}^{ee} \mathbf{q}^2 \mathbf{v}^e + \mathbf{L}^{ee} (\mathbf{L}^{te})^T \partial_{zz}^2 v^t \\ \partial_{\tau\tau}^2 v^t &= L^{tt} \left[ L^{tt} - (\mathbf{K}^{et})^T \mathbf{L}^{ee} (\mathbf{L}^{te})^T \right] \partial_{zz}^2 v^t - L^{tt} (\mathbf{K}^{et})^T \mathbf{L}^{ee} \left[ (\mathbf{L}^{ee})^T \partial_{zz}^2 \mathbf{v}^e - \mathbf{q}^2 \mathbf{v}^e \right] - L^{tt} J^H.\end{aligned}\quad (8)$$

Відповідна числова схема крокування у часі має вигляд:

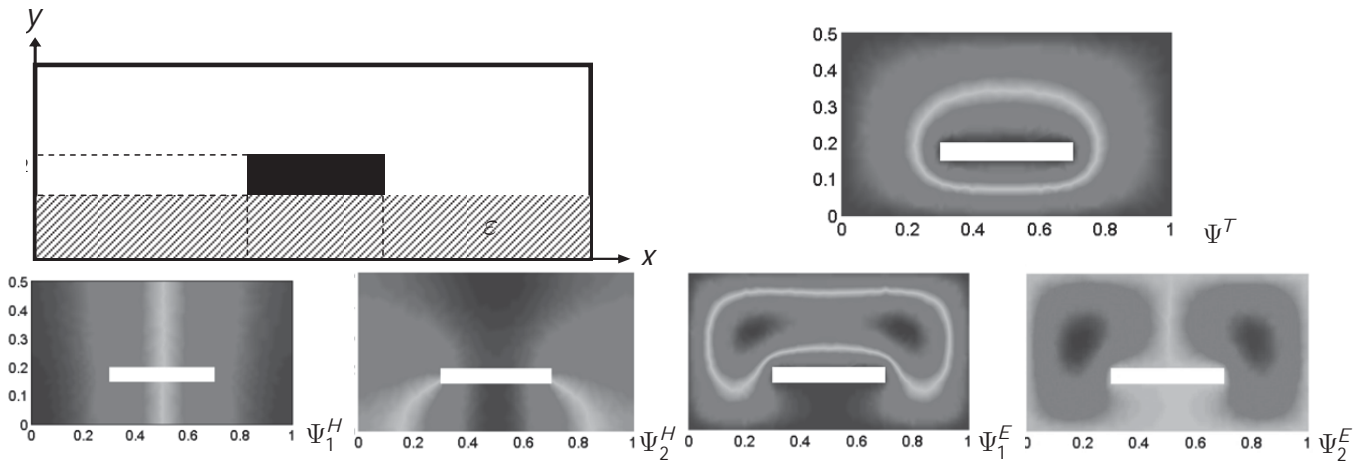
$$\begin{aligned}\mathbf{v}^e|_i^{j+1} &= a_1 (\mathbf{v}^e|_{i+1}^j + \mathbf{v}^e|_{i-1}^j) + a_2 \mathbf{v}^e|_i^j - \mathbf{v}^e|_i^{j-1} + a_3 (v^t|_{i+1}^j - 2v^t|_i^j + v^t|_{i-1}^j) \\ v^t|_i^{j+1} &= b_1 (v^t|_{i+1}^j + v^t|_{i-1}^j) + b_2 v^t|_i^j - v^t|_i^{j-1} + b_3 (\mathbf{v}^e|_{i+1}^j + \mathbf{v}^e|_{i-1}^j) + b_4 \mathbf{v}^e|_i^j + F|_i^j,\end{aligned}\quad (9)$$

де коефіцієнти оновлення полів  $a, b$  виражаються певним чином через матричні коефіцієнти та крок сітки у просторі  $\Delta Z$  та часі  $\Delta\tau$ . Для порівняння результатів було також проведено розрахунок поширення імпульсної хвилі для тих же умов збудження струмами TEM-моди за допомогою традиційного повнохвильового методу FDTD. На рис. 1 показано збіг обох розв'язків та продемонстровано швидкість збігу модового розв'язку зі збільшенням кількості мод, що враховано при моделюванні.



**Рис. 1.** Ліворуч: часова залежність поля у певній точці простору при моделюванні методом FDTD (крапки) та методом ММБ (зверху – одномодове наближення, знизу – тримодове наближення). Праворуч: різниця між послідовними наближеннями методом ММБ з урахуванням  $n$  та  $n + 1$  моди для  $n = 1(-), 2(\times), 3(o), 4(\dots)$ .

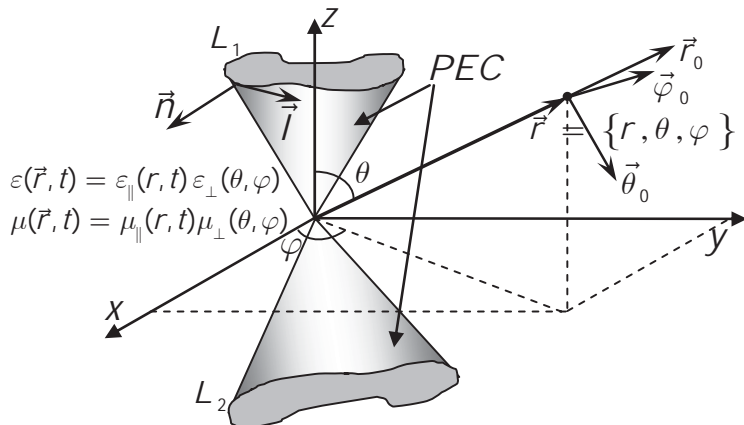
В цьому випадку модові функції було знайдено в аналітичному вигляді. Аналіз збіжності розв'язку (права частина рис. 1) показує, що збільшення кількості мод додає експоненційно малі внески. Це відповідає очікуваній спектральній швидкості збігання, притаманній проєктивним методам, що використовують функції розкладання, які задовольняють більшості умов задачі. Між тим, строге доведення експоненційної збіжності методу є далеко нетривіальним завданням і виходить за рамки проведеного дослідження.



**Рис. 2.** Геометрія та базисні функції для екранованої мікросмушкової лінії.

Слід зазначити, що ММБ легко застосовується і до структур зі складною геометрією. Наприклад, на рис. 2 зображено екрановану мікросмушкову лінію на діелектричній підкладці (розміри взяті довільно). Для неї модові функції було побудовано із застосуванням двовимірного методу скінченних елементів, який адаптивно будує трикутникову сітку з урахуванням особливостей полів на ребрах. У результаті числового розв'язання задачі на власні значення отримуємо значення модових функцій, які використовуються для числового інтегрування у (6) для одержання матричних елементів та відповідних коефіцієнтів числової схеми (9). Таким чином, перевагою ММБ є можливість розділення чотиривимірної задачі на двовимірну задачу на визначення базису та одновимірну нестационарну задачу поширення для кількох пов'язаних хвиль. При цьому до кожної з цих задач можна застосувати різні найбільш придатні методи.

У розділі 3 «Метод модового базису в кінечних хвилеводах» аналогічно другому розділу розглядається задача побудови модових розкладань у часовій області на основі неповного розділення змінних, але на цей раз у сферичній системі координат, де радіальна координата грає роль поздовжньої координати, а кутові координати є поперечними. Таким чином ми можемо розглядати регулярні лінії, що складаються з кількох ідеально провідних конусів, що обмежені контурами  $L_j$ , із середовищем між ними, що має матеріальні параметри у факторизованій формі добутку функцій від кутових координат та від радіальної координати та часу (див. рис. 3). Методологія застосування ММБ залишається тією ж: в операторній формі відділяємо частину рівнянь Максвелла, що містить кутові похідні та кутові залежності матеріальних параметрів, вводимо для



**Рис. 3.** Геометрія задачі.

них відповідний функціональний простір, в якому вони є самоспряженими. Із задачі на власні значення для операторів отримуємо моди для розкладання полів. Для зручності запису рівнянь та аналізу зміни форми модових амплітуд при поширенні, у визначенні амплітуд враховане згасання, що відбувається через збільшення поверхні фронту при поширенні:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_0^{1/2} \vec{E}(r, \theta, \varphi, t) &= \frac{1}{r} \left( \sum_m e_m^H(r, t) \vec{E}_m^H(\theta, \varphi) + \sum_n e_n^E(r, t) \vec{E}_n^E(\theta, \varphi) + \sum_k e_k^T(r, t) \vec{E}_k^T(\theta, \varphi) \right) \\
\mu_0^{1/2} \vec{H}(r, \theta, \varphi, t) &= \frac{1}{r} \left( \sum_m h_m^H(r, t) \vec{H}_m^H(\theta, \varphi) + \sum_n h_n^E(r, t) \vec{H}_n^E(\theta, \varphi) + \sum_k h_k^T(r, t) \vec{H}_k^T(\theta, \varphi) \right) \\
\varepsilon_0^{1/2} E_r(r, \theta, \varphi, t) &= \frac{1}{r^2} \sum_n e_n^r(r, t) q_n \Phi_n^E(\theta, \varphi); \mu_0^{1/2} H_r(r, \theta, \varphi, t) = \frac{1}{r^2} \sum_m h_m^r(r, t) p_m \Phi_m^H(\theta, \varphi).
\end{aligned} \quad (10)$$

За процедурою, що аналогічна викладеній у другому розділі отримуємо систему еволюційних хвилевідних рівнянь (СЕР) для цього випадку у формі:

$$\begin{aligned}
\partial_r r^2 \mu_{\parallel} \left( \partial_{\tau} (\varepsilon_{\parallel} \mathbf{e}^h) + \partial_r (\mathbf{L}^{hh} \cdot \mathbf{i}^h + \mathbf{L}^{he} \cdot \mathbf{i}^e + \mathbf{L}^{ht} \cdot \mathbf{i}^t) \right) - \mu_{\parallel} \mathbf{P}^2 \cdot \mathbf{i}^h &= \mathbf{s}_1, \\
\partial_r r^2 \varepsilon_{\parallel} \left( \partial_{\tau} (\mu_{\parallel} \mathbf{i}^e) + \partial_r \left( (\mathbf{L}^{he})^T \cdot \mathbf{v}^h + (\mathbf{L}^{ee})^T \cdot \mathbf{v}^e + (\mathbf{L}^{te})^T \cdot \mathbf{v}^t \right) \right) - \varepsilon_{\parallel} \mathbf{Q}^2 \cdot \mathbf{v}^e &= \mathbf{s}_2, \\
r^2 \partial_{\tau} \mu_{\parallel} \left( \partial_r \mathbf{i}^h + \partial_r \varepsilon_{\parallel} \left( (\mathbf{K}^{hh})^T \cdot \mathbf{v}^h + (\mathbf{K}^{eh})^T \cdot \mathbf{v}^e + (\mathbf{K}^{th})^T \cdot \mathbf{v}^t \right) \right) + \mathbf{P}^2 \cdot \mathbf{v}^h &= \mathbf{s}_3, \\
r^2 \partial_{\tau} \varepsilon_{\parallel} \left( \partial_r \mathbf{v}^e + \partial_r \mu_{\parallel} (\mathbf{K}^{eh} \cdot \mathbf{i}^h + \mathbf{K}^{ee} \cdot \mathbf{i}^e + \mathbf{K}^{et} \cdot \mathbf{i}^t) \right) + \mathbf{Q}^2 \cdot \mathbf{i}^e &= \mathbf{s}_4,
\end{aligned} \quad (11)$$

де матричні коефіцієнти визначаються через інтеграли між базисними функціями:

$$\begin{cases} L_{mn}^{ab} = \frac{1}{4\pi} \int_S \vec{r}_0 \cdot [\vec{E}_m^a \times \vec{H}_n^b] dS, \\ K_{mn}^{ab} = \frac{1}{4\pi} \int_S \varepsilon_{\perp} \mu_{\perp} \vec{r}_0 \cdot [\vec{E}_m^a \times \vec{H}_n^b] dS, \end{cases} \quad a, b \in \{h, e, t\}. \quad (12)$$

Якщо СЕР для циліндричних хвилеводів (5) може бути умовно зведена до рівняння Клейна-Гордона з матричними коефіцієнтами, то у випадку конічної лінії СЕР (11) може бути зведена (якщо умовно знехтувати міжтиповою взаємодією) до рівняння Клейна-Гордона-Фока з матричними коефіцієнтами, що описують міжмодові взаємодії:

$$(\mathbf{K}^{hh} \partial_{\tau}^2 - \mathbf{L}^{hh} \partial_z^2 + r^{-2} \mathbf{P}^2) \cdot \mathbf{i}^h = 0. \quad (13)$$

Особливістю цього рівняння є те, що частоти відсічки, які розмежують режим поширення та згасання, є залежними від радіусу. Тобто чим далі від центру поширюється хвиля, тим більше мод на заданій частоті стає поширюваними. Тому для збіжності розв'язку у випадку пов'язаних мод слід обирати таку кількість мод, які є поширюваними на найбільшому радіусі, де потрібно мати розв'язок. Збіжність розкладання за сферичними гармоніками (модами) було перевірено на задачі випромінювання кільця зі струмом, що може бути розв'язана точно на основі запізнених потенціалів.

На початку розділу 4 «Метод модового базису у відкритих діелектричних хвилеводах» розглянуто модове розкладання у циліндричній системі координат для вільного простору. Це призводить до того, що замість модової суми записують інтеграл по «бесселевим» модам. Для числового розрахунку цих інтегралів при дослідженні поширення імпульсного пучка від гаусового розподілу струмів на площині було отримано оптимальну гаусову квадратурну формулу. Об'єктом дослідження стала кривизна імпульсного фронту у ближній та проміжній зоні та закон згасання амплітуди у проміжній зоні. Відомим є спосіб характеризувати випромінювання імпульсної антени за допомогою нормалізованого імпульсного відгуку у формі:

$$\vec{E}(t, R, \vec{n}) Z_0^{-1/2} = (2\pi R' c)^{-1} \vec{h}_n(t, \vec{n}) * \partial_t V_{exc}(t) Z_c^{-1/2} * \delta(t - R'/c). \quad (14)$$

У цій формулі  $R''$  відповідає запізненню та має обраховуватись від «часового центру», а  $R'$  відповідає згасанню та відраховується від «амплітудного центру». Ви-

значено, що часовий центр спочатку знаходиться на нескінченності позаду площини збудження, що відповідає пласкому фронту у ближній зоні доки дифракційне поширення ще не задіяне. Далі з поширенням хвилі її центр кривизни (часовий центр) наближується до площини збудження та перетинає її виходячи на сталий рівень десь на відстані 6-7 поперечних розмірів пучку попереду від площини збудження. У той же час встановлено, що амплітудний центр завжди знаходиться позаду площини, зі зменшенням поперечних розмірів пучка він очікувано наближується до площини збудження (перехід до точкового джерела).

Далі було побудовано ММБ для аналізу збудження та поширення імпульсних сигналів у *відкритих діелектричних хвилеводах*. Як і для вільного простору задача на власні значення для визначення мод має неперервний спектр, модові розкладання є інтегралами по спектральному параметру (параметр розділення змінних).

$$\varepsilon_0^{1/2} \vec{E}(z, t, \vec{r}) = \int_{\rho} \left( v^h(z, t, \rho) \vec{E}^h(\vec{r}; \rho) + v^e(z, t, \rho) \vec{E}^e(\vec{r}; \rho) \right) d\rho. \quad (15)$$

Для простоти ми навели інтеграл лише для електричного поля, решта аналогічні представлення (4) із заміною сум на інтеграли. СЕР для цього випадку замість (5) перетворюється на систему інтегро-диференційних рівнянь на кшталт такого:

$$\int \left( K^{hh}(\rho', \rho) \partial_{\tau}^2 - L^{hh}(\rho', \rho) \partial_z^2 + \rho'^2 \right) v_h(z, t; \rho') d\rho' + \int K^{eh}(\rho', \rho) \partial_{\tau}^2 v_e(z, t; \rho') d\rho' = S(z, t; \rho). \quad (16)$$

Тобто матричні коефіцієнти замінені на інтегральні ядра. Ці ядра задовольняють тим самим співвідношенням, що були раніше отримані для матриць коефіцієнтів у закритому хвилеводі. Розроблено числову схему розв'язання цієї системи інтегро-диференційних рівнянь, яка базується на використанні методу моментів. Спектральні характеристики представлено у вигляді розкладання за системою кусково-сталих функцій. Як наслідок, систему інтегро-диференційних рівнянь було зведено до системи матричних диференційних рівнянь, для якої побудовано скінченно-різницеву явну розрахункову схему аналогічну (9). Проведено моделювання поширення імпульсу при збудженні круглого діелектричного хвилеводу кільцевим струмом (рис. 4). Для верифікації результатів було також створено розрахункову програму на основі методу FDTD для тіл обертання (BOR-FDTD) з супроводжуючим вікном, що дозволяє при обмеженому розмірі обчислюваного об'єму моделювати поширення головної частини імпульсної хвилі на значні відстані. Підтверджено збіжність результатів обох методів.

В результаті числового моделювання у часовій області процесу збудження та поширення імпульсного сигналу у відкритому діелектричному хвилеводі було виявлено та проаналізовано нове фізичне явище у вигляді імпульсної поверхневої хвилі-передвісника, яка поширюється вздовж хвилеводу зі швидкістю світла у вільному просторі, зберігаючи свою просторову структуру при поширенні. Ця хвиля виникає через заломлення частини випромінювання від джерела під кутами, близькими до куту повного внутрішнього відбиття. Крім того, хвилі від джерела, що пройшли через межу під більшими кутами, формують випромінене поле у вигляді сферичної хвилі (рис. 4). На межі діелектрику цей сферичний фронт переходить у поверхневу хвилю: завдяки ефекту, що є схожим за механізмом з черенковським випромінюванням, відбувається формування конічного фронту вглиб діелектрика. Цей фронт поширюється під кутом критичного заломлення до межі (рис. 5). Швидкість поширення цього конічного фронту у напрямку перпендикулярно до нього дорівнює швидкості світла у діелектрику, а швидкість його поширення вздовж вісі хвилеводу відповідає швидкості світла в оточуючому вільному просторі. Коли цей конічний фронт



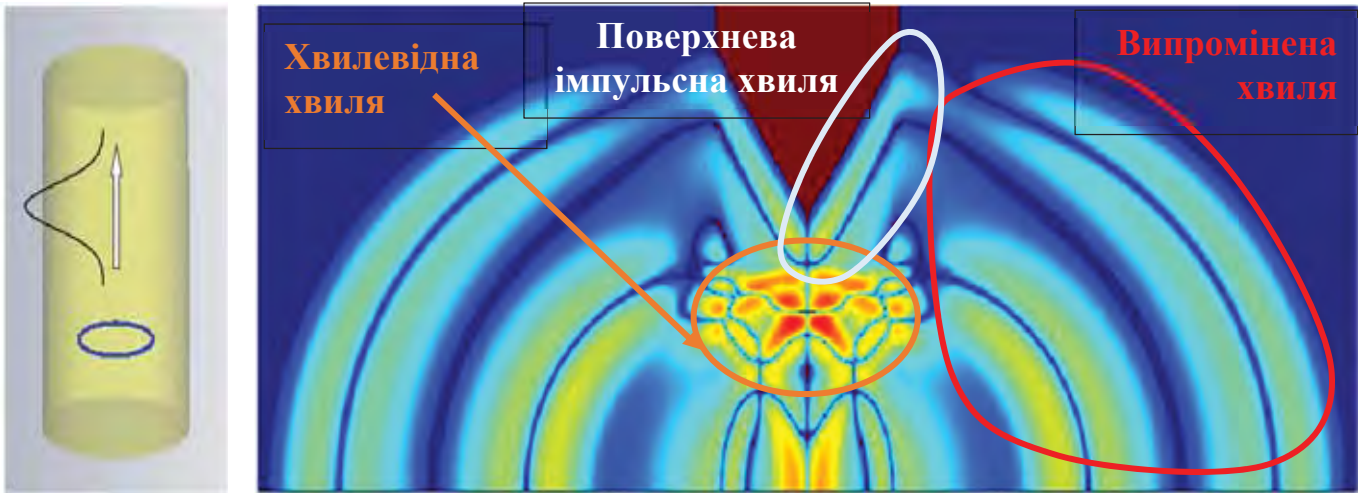


Рис. 4. Геометрія задачі та утворення структур хвилі поблизу джерела.

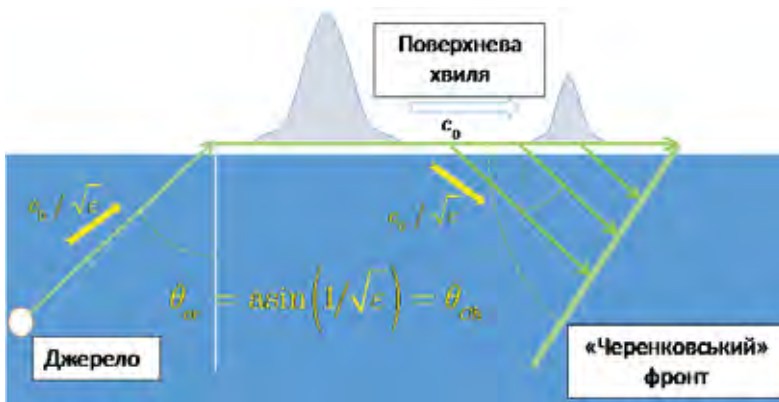


Рис. 5. Механізм формування імпульсної поверхневої хвилі.

доходить до вісі, він перетворюється на конічний фронт, що розширюється, та знов падає на межу діелектрик-повітря під критичним кутом, утворюючи наступну петлю структури поверхневої хвилі. Як наслідок, формується хвильова структура на кшталт ножиць, що поширюється вздовж хвильоводу зі швидкістю світла у вільному просторі у вигляді передвіснику основної частини хвилі (рис. 6).

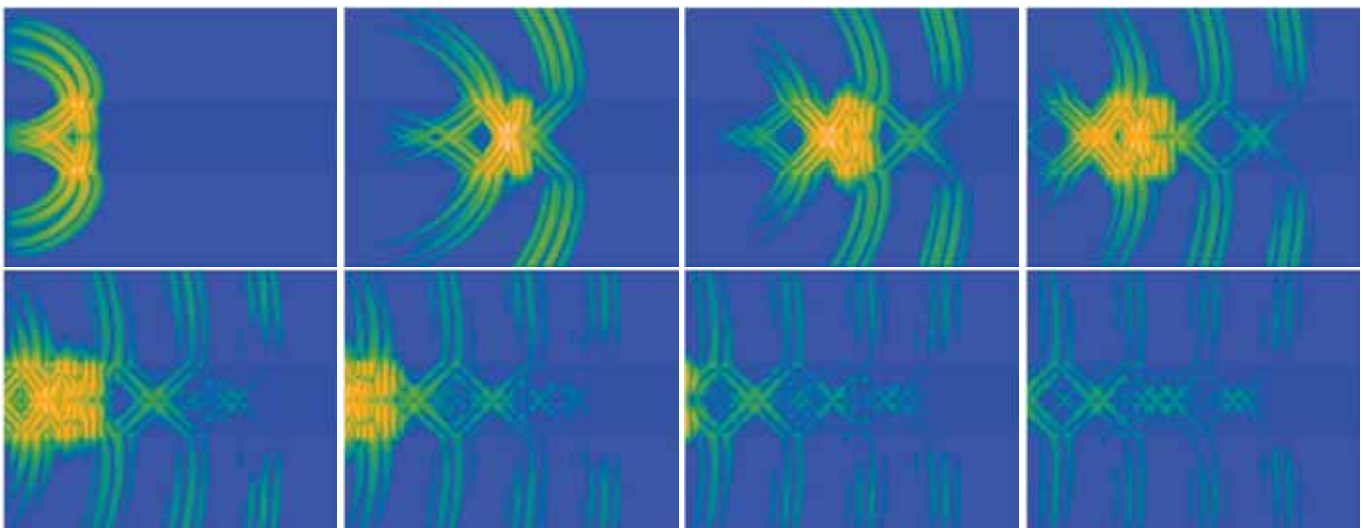
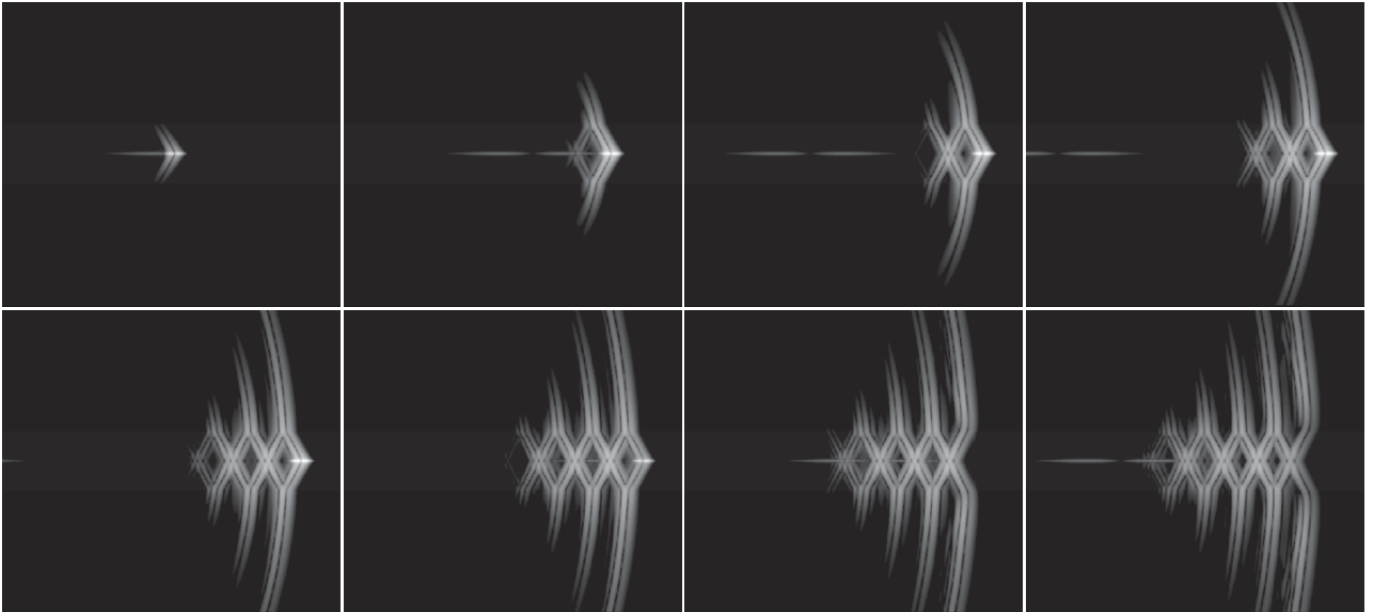


Рис. 6. Розподіл густини електромагнітної енергії у діелектричному хвильоводі ( $\epsilon = 4$ ) у кілька послідовних моментів часу у супроводжуючому вікні.

Для дослідження збудження та довготривалого поширення імпульсної поверхневої хвилі окремо від хвильовідної частини було застосовано збудження дипольним джерелом, що включалось вздовж вісі бігучою хвилею, утворюючи подобу черенковського джерела. Результати моделювання у супроводжуючому вікні зображено на рис. 7.

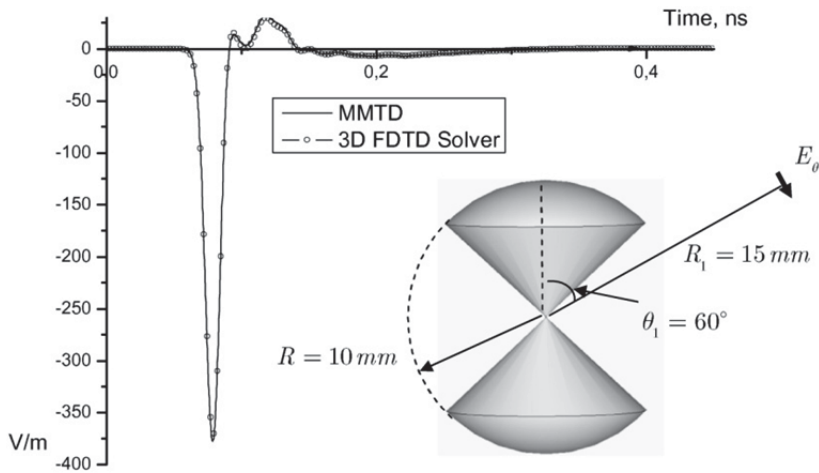




**Рис. 7.** Густина енергії в діелектричному хвилеводі у кілька моментів часу при збудженні поверхневої імпульсної хвилі черенковським джерелом на осі хвилеводу.

У розділі 5 «Розв'язання широкосмугових задач дифракції» на початку розглянуто низку задач одномодової дифракції. Розв'язання велось у рамках методу операторів дифракції, що є операторами типу 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 магнітодіелектричних середовищ із втратами у хвилеводі. Отримано аналітичні вирази для відповідних операторів відбиття та проходження. Досліджено особливі випадки ізоімідансних та ізорефракційних середовищ, для яких стають нульовими відповідно миттєва та резонансна частини операторів відбиття. Далі, за допомогою одержаних аналітичних виразів та (для перевірки) прямого числового моделювання за методом FDTD, було досліджено падіння імпульсної Е-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. Проаналізовані випадки збудження імпульсом та циклом, що призводить до експоненційного та коливального режимів відповідно.

Далі, для розв'язання більш складних задач многомодової дифракції було запропоновано відомий у частотній області метод узгодження мод перенести до часової області. Цей метод застосовується для аналізу дифракції на стиках хвилеводів, які мають умовно нульовий об'єм, на кшталт діафрагм, стрибків, розгалужень тощо. Суть методу полягає в перерозкладанні полів на спільній апертурі за системами хвиль лівого та правого хвилеводів та розкладанні нульових граничних умов на фланці за системою хвиль широкого хвилеводу. Ця процедура призводить до матричного формулювання граничних умов на стику, яку доповнюють простими умовами для імідансів мод, що беруть участь у формулюванні, та розв'язують, отримуючи



**Рис. 8.** Моделювання імпульсного випромінювання біконічної антени при збудженні імпульсом Гауса.

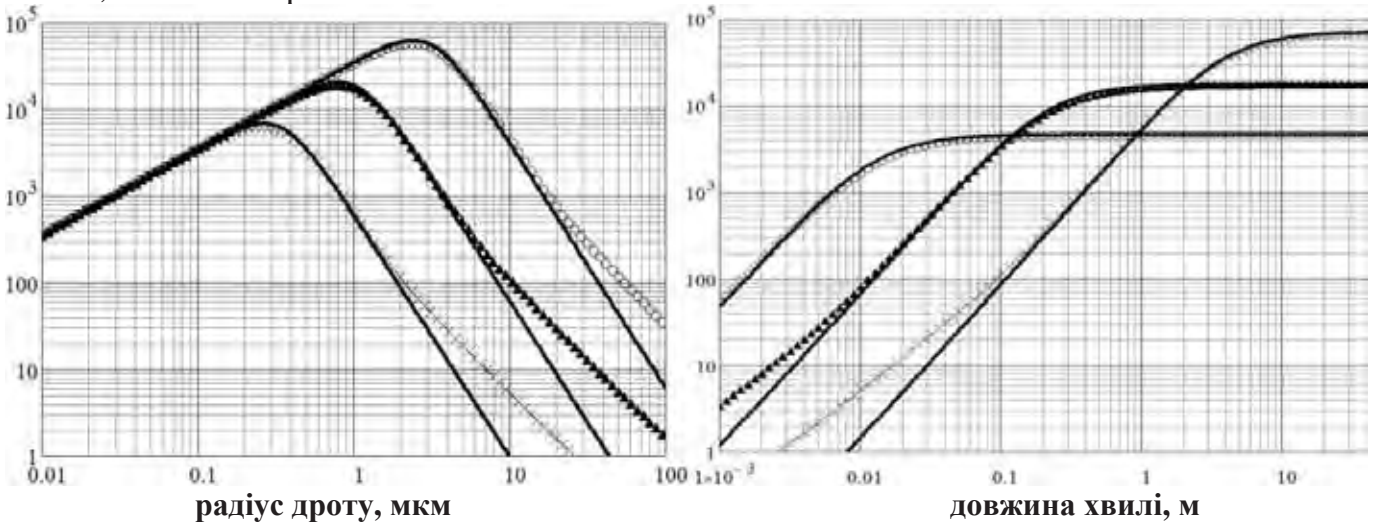
граничні умови накладаються не на окремій частоті, а у кожен момент часу. Хвилеводи, що стикаються, моделюються кількома модовими каналами (одновимірною задачею поширення), в яких на кінці (в спільній точці стику), застосовується побудована матриця для оновлення модових амплітуд в усіх каналах за допомогою інформації з попереднього часового кроку в інших модових каналах.

Цей метод було апробовано на кількох простих структурах: стрибку у плоско-паралельному хвилеводі, стику коаксіального та круглого хвилеводів, випромінюванні біконічної антени. В останньому випадку (рис. 8) апертура біконічної антени розглядалась як стик біконічної лінії та вільного простору, кожна з цих частин є регулярним хвилеводом, у якому поширюються незалежні моди. 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 широко-смугове поглинання у тонкому провідному дроті при нормальному падінні на нього E-поляризованої хвилі. Аномальність процесу полягає в тому, що перетин поглинання на кілька порядків перевищує геометричні розміри дроту. Наприклад, для мідного дроту як видно з рис. 9 фактор поглинання сягає майже  $10^5$ . Точний розв'язок цієї задачі є давно відомим, він легко будується на основі розкладання плоскої хвилі на циліндричні (функції Бесселя) та накладання граничних умов. Наближену модель запропоновано у вигляді послідовної провідності та індуктивності. Індуктивність нескінченного прямого круглого дроту у статичному наближенні є нескінченною, тому було розраховано залежну від частоти індуктивність у динамічному наближенні з урахуванням запізнення фази магнітного поля, створеного окремими частинами дроту. 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 дроту. Для прикладу, на рис. 9 зображено отримані за апроксимуючою формулою залежності у випадку, коли враховано резистивність та індуктивність дроту, але скін-ефект не доданий. Легко побачити, що така модель описує два режими та відхиляється на краю діапазону, де починає діяти скін-ефект. Включення скін-

матрицю розсіювання. У дисертації застосовано аналогічний метод побудови матриці, що моделює ефект міжмодового зв'язку на неоднорідності. Матриця отримується за аналогічною процедурою перерозкладання полів за системами мод хвилеводів по обидва боки стику. Далі ця матриця використовується для оновлення модових амплітуд у точці стику у кожний наступний крок моделювання у часі. Тобто

ефекту до моделі дає добре узгодження апроксимації у всьому діапазоні. Розбіжності, що залишаються, можуть бути віднесені на рахунок резистивності випромінювання, яка має порівняно невеликий вплив.



**Рис. 9.** Залежність фактору поглинання при нормальному падінні Е-хвилі на мідний дріт. Ліворуч – залежність від радіусу дроту для довжин хвиль 0.1 м (x), 1 м (▲), 10 м (○). Праворуч – залежність від довжини хвилі для радіусів дроту 0.13 мкм (△), 0,5 мкм (□), 2 мкм (○). Точками зображено точну залежність, лініями – апроксимацію з врахуванням індуктивності та без врахування скін-ефекту.

У розділі 6 «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 тлі 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 тлі на кілька порядків сильніших магнітних полів Землі та антропогенних шумів. Це коло питань 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. Для пришвидшення збіжності розв'язку зворотної задачі використовувався метод Левенберга-Марквардта, а для пошуку глобального максимуму — алгоритми рою часток та інші. У будь-якому разі алгоритми засновано на лінійному зв'язку відгуку датчиків із амплітудою точкового джерела магнітного поля (магнітного чи токового диполю). Тому було запропоновано певні 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, що рознесені у просторі) мають різні матриці коваріації. Отже проектуванням виміряного сигналу на підібраний підпростір можна розділити завади від віддалених джерел та сигнал від локального джерела (серця). Для такого розділення було запропоновано два методи. По-перше, це традиційний метод «власних ортогональних мод», що застосовується у статистичній обробці зображень. Цей 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 проєкції на які є найбільшою). Інший запропонований метод базується на спостереженні, що просторові похідні від магнітних полів, що створює локальне джерело спадають з відстанню за ступеневим законом, який визначається сумарним ступенем похідної. Тому запропоновано виділяти підпростори на основі тейлоровських мод, що відповідають тейлоровському розкладанню векторного магнітного поля у ступеневі ряди. Було проведено порівняння цих двох методів, зокрема з урахуванням можливої неідеальності сенсорів (роз'юстирування окремих сенсорів, розкид у чутливості). Для прикладу на рис. 10 зображено ослаблення сигналу та шуму при застосуванні кількох досліджених методів просторової фільтрації, а у табл. 1 наведено похибки визначення координат диполю для початкового рівня сигнал/шум у 100 дБ та кількох методів фільтрації.

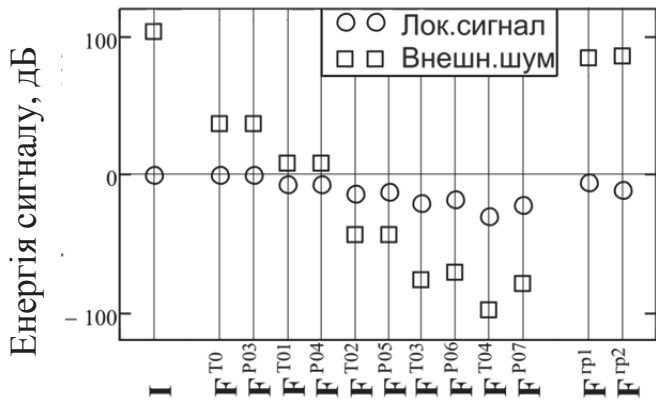


Рис. 10. Ослаблення сигналу та завад різними фільтрами для неідеальних датчиків

Наприкінці запропоновано метод нестационарної фільтрації, заснований на тому факті, що ширина спектру широкосмугового кардіосигналу змінюється у часі, що видно на рис. 11. 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. Як видно з рис. 12 такий підхід дає додатково біля 4 дБ покращення відношення сигнал/шум порівняно з традиційною стаціонарною вінерівською фільтрацією.

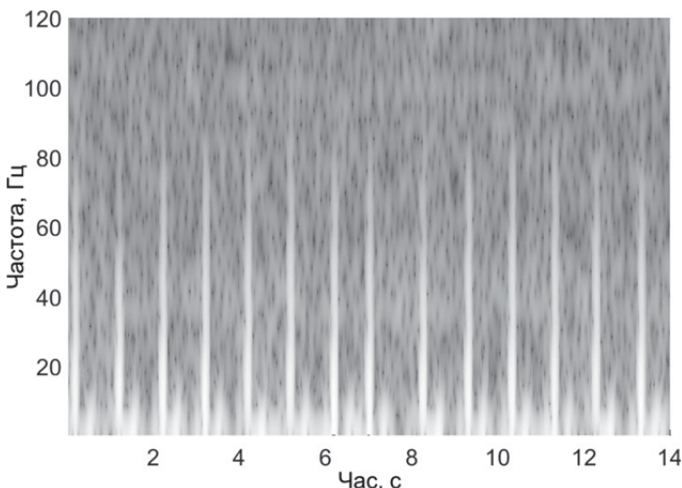


Рис. 11. Часо-частотна діаграма типового кардіосигналу

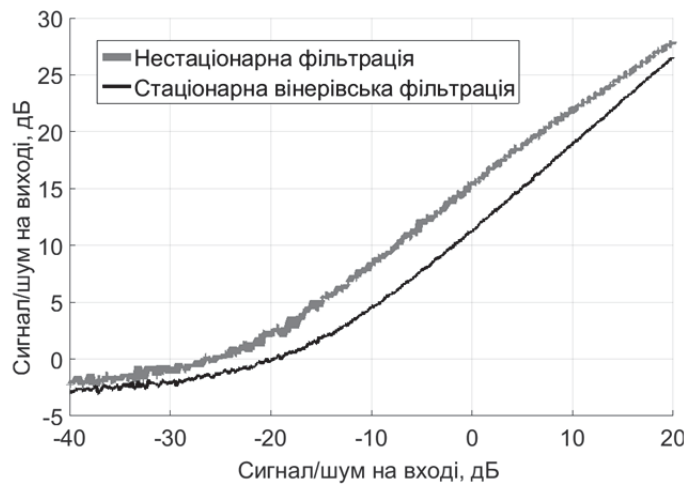


Рис. 12. Ефективність стаціонарної та нестационарної фільтрації.

Таблиця 1

Похибка визначення координат струмового диполю на різній глибині для кількох методів фільтрації

z, см	рівень шуму, дБ	$\delta r_Q$ , см			
		$F^{T02}$	$F^{P05}$	$F^{T03}$	$F^{P06}$
10	100	0.119	0.116	$3.9 \cdot 10^{-3}$	$3.6 \cdot 10^{-3}$
15		0.288	0.284	0.012	0.011
17		0.383	0.376	0.017	0.015



## ВИСНОВКИ

У дисертації створено новий науковий напрямок дослідження хвилеведучих систем з поперечно-неоднорідним заповненням у різноманітних конфігураціях шляхом побудови методів модових розкладань у часовій області. Головною проблемою, на вирішення якої спрямовано побудований метод є перенос поняття хвилевідних мод з частотної області у часову для випадку поперечно-неоднорідних хвилеводів, коли традиційні моди у частотній області є залежними від частоти. Метод було застосовано для побудови аналітично-числових схем розв'язання цілої низки задач, отримано нові аналітичні результати для операторів дифракції. У ході дослідження було також виявлено та проаналізовано кілька нових фізичних явищ.

Найбільш важливі наукові та практичні результати, які сприяли вирішенню наукової проблеми є такими:

1. Метод модового базису для закритих циліндричних хвилеводів узагальнено на випадок хвилеводів з багатозв'язною областю поперечного перетину та факторизованою залежністю матеріальних параметрів середовища. Для цього було додатково сформульовано задачу на власні значення для ТЕМ-хвиль, обґрунтовано розділ функціонального простору розв'язків на Е-, Н-, та Т- хвилі. Отримано систему еволюційних рівнянь (СЕР), яка описує зміну часової форми модових амплітуд при поширенні хвилі вздовж хвилеводу. СЕР, зокрема, відображає міжмодові перетворення між усіма типами хвиль. Цим перетворенням відповідають матриці коефіцієнтів, частина з яких виявились тотожно нульовими матрицями, для решти доведено кілька співвідношень, що дозволяють виражати одні матриці через інші. Доведені властивості матричних коефіцієнтів було використано при побудові числової схеми розв'язання СЕР. Одержано явний вигляд схеми, коли часова похідна виражається через решту доданків, що дозволяє крокувати у часі від початкових умов. Узагальнення методу на хвилеводи з багатозв'язною областю перетину дозволило ефективно розглянути поширення імпульсів в актуальному класі ліній передачі з квазі-ТЕМ хвилями, наприклад, в екрановані мікросмужкові лінії на діелектричній підкладинці. Порівняно з традиційними методами запропонований метод має цілу низку переваг. Чотирирівнірна задача замінюється двовимірною задачею на визначення базису та одновимірною нестационарною задачею поширення для кількох пов'язаних хвиль. Коли така задача розв'язується поширеними методами FDTD, FVTD, чи FEM, то дискретизації потребує весь об'єм хвилеводу (задача тривимірною у просторі). Натомість у ММБ дискретизуються лише кілька хвильових каналів вздовж хвилеводу (задача одновимірною, векторною). Проведені числові експерименти встановили швидку збіжність модових розкладань для сигналів з обмеженою спектральною смугою. Збіжність розв'язків при збільшенні кількості мод, що враховуються, стає експоненційною, щойно враховано усі моди (скінченна кількість), що є поширюваними у смузі частот сигналу. Тобто отримано експоненційну збіжність замість ступеневої у традиційних сіткових методах. Слід зазначити, що традиційні модові методи у часовій області непридатні для аналізу поширення імпульсних сигналів, бо вимагають розв'язання складної граничної задачі на кожній частоті спектру сигналу. Натомість у запропонованому підході модові розподіли не залежать від частоти та мають бути



визначеними лише один раз, що продемонстровано на прикладі аналізу поширення імпульсу в екранованій копланарній смужковій лінії.

2. Побудовано метод модового базису для конічних хвилеводів з багатозв'язною областю поперечного перетину та факторизованою залежністю матеріальних параметрів середовища. Рівняння Максвела представлено в операторному вигляді з відокремленою кутовою частиною похідних та з кутовими залежностями матеріальних параметрів; введено функціональний простір, що забезпечує самоспряженість цього оператору. Доведено, що функціональний простір розв'язків розкладається на підпростори E-, H- та T- хвиль, для кожного з них сформульовано граничні задачі на власні значення для визначення елементів базису (мод). Одержано та проаналізовано систему еволюційних хвилевідних рівнянь, що описує зміну часової форми модових амплітуд з поширенням вздовж радіального напрямку. У цьому випадку система виглядає як рівняння Клейна-Гордона-Фока з матричними коефіцієнтами та доданками, що описують міжтипові перетворення. З аналізу поширення імпульсу на простому прикладі випромінювання кільця зі струмом встановлено, що зі збільшенням радіусу кількість мод, що не є згасаючими, збільшується, і, через наявність міжмодового зв'язку, їх потрібно враховувати у числовій схемі розв'язку. Отже, запропонована схема дає переваги лише для аналізу поширення хвиль в околі центру збудження. Це може бути застосовано до аналізу антен з діелектричним заповненням, наприклад, ТЕМ-рупорів з діелектричним навантаженням. При цьому кількість мод, що мають бути враховані в розрахунку, визначається кількістю мод, що є поширюваними при максимальному радіусі, де ще відбуваються міжмодові перетворення, тобто на апертурі антени. Далі у вільному просторі моди поширюються окремо одна від одної, отже, якщо вищі моди не були збуджені з помітною амплітудою на апертурі, то при подальшому поширенні хвилі у дальню зону, вони не внесуть суттєвого внеску до випромінюваного поля. Визначення початкових амплітуд мод у вільному просторі, що збуджуються на апертурі антени, може бути здійснено описаним у п'ятому розділі методом перерозкладання (метод узгодження мод).
3. Було побудовано метод модового базису для аналізу збудження та поширення імпульсних сигналів у відкритих діелектричних хвилеводах. Особливістю відкритих структур є те, що задача на власні значення для визначення мод має неперервний спектр. Як наслідок, модові розкладання є не сумами, а інтегралами. Тобто моди залежать від спектрального параметру, за яким ведеться інтегрування. Це вимагає, зокрема, особливої уваги при нормуванні базисних функцій. Як наслідок, отримано систему інтегро-диференціальних еволюційних хвилевідних рівнянь, яка замість матричних коефіцієнтів має ядра інтегралів, що описують міжмодові та міжтипові перетворення. Ці ядра задовольняють тим самим співвідношенням, що були раніше отримані для матриць коефіцієнтів у закритому хвилеводі. Розроблено числову схему розв'язання системи інтегро-диференціальних рівнянь, яка базується на використанні методу моментів. Спектральні характеристики представлені у вигляді розкладання за системою кусково-сталих функцій. Побудовано та пронормовано модові функції для круглого діелектричного хвилеводу. Отримано ядра міжмодових перетворень, для них отримані матриці у рам-

ках методу моментів. Як наслідок, систему інтегро-диференційних рівнянь було зведено до системи матричних диференційних рівнянь, для якої, аналогічно другому розділу, побудовано скінченно-різницеву явну розрахункову схему. Проведено моделювання поширення імпульсу. Для верифікації результатів було також створено розрахункову програму на основі методу FDTD для тіл обертання (BOR-FDTD) з супроводжуючим вікном, що дозволяє при обмеженому розмірі обчислюваного об'єму моделювати поширення головної частини імпульсної хвилі на значні відстані. Підтверджено збіжність результатів обох методів.

4. В результаті числового моделювання у часовій області процесу збудження та поширення імпульсного сигналу у відкритому діелектричному хвилеводі було виявлено та проаналізовано нове фізичне явище у вигляді імпульсної поверхневої хвилі-передвісника, яка поширюється вздовж хвилеводу зі швидкістю світла у вільному просторі, зберігаючи свою просторову структуру при поширенні. Ця хвиля виникає через заломлення частини випромінювання від джерела під кутами, близькими до куту повного внутрішнього відбиття. Крім того, хвилі від джерела, що пройшли через межу під більшими кутами, формують випромінене поле у вигляді сферичної хвилі. На межі діелектрику цей сферичний фронт переходить у імпульсну поверхневу хвилю. Завдяки ефекту, що є схожим за механізмом з черенковським випромінюванням, відбувається формування конічного фронту вглиб діелектрика, що поширюється під кутом критичного заломлення до межі. Швидкість поширення цього конічного фронту у напрямку перпендикулярно до нього дорівнює швидкості світла у діелектрику, а швидкість його поширення вздовж вісі хвилеводу відповідає швидкості світла в оточуючому вільному просторі. Коли цей конічний фронт доходить до вісі, він перетворюється на фронт, що розширюється, та знов сягає межі діелектрик-повітря під критичним кутом, утворюючи наступну пелюстку поверхневої хвилі. Як наслідок, формується хвильова структура на кшталт ножиць, що поширюється вздовж хвилеводу у вигляді передвісника основної частини хвилі зі швидкістю світла у вільному просторі. Виявлений ефект має значне практичне значення, оскільки відкриває шлях до створення низки нових резонансних елементів, які базуються на взаємодії таких конічних фронтів з конічними дзеркалами та плоскою поверхнею.
5. На основі методу розкладання хвильового пучка в інтеграл за бесселевими модами та застосування до нього оптимальної квадратури, було створено обчислювальний метод, за допомогою якого проаналізовано зміну характеристик кривизни імпульсного хвильового пучка при поширенні. За аналогією з відомим у частотній області поняттям фазового центру було запропоновано ввести поняття окремих амплітудного та часового центру для адекватного опису поведінки імпульсних полів у проміжній зоні імпульсних антен. Амплітудний центр визначає точку, від якої відбувається згасання амплітуди фронту у дальній зоні за зворотною ступеневою залежністю. Натомість часовий центр визначає центр кривизни фронту, тобто він потрібен для опису параксіальної частини пучка. Виявлено особливості поведінки імпульсного хвильового пучка, що утворюється гаусовим розподілом струмів на площині при імпульсному збудженні лягерівським імпульсом. Амплітудний центр є інтегральною характеристикою поширення пучку, у

той же час часовий центр є миттєвою характеристикою фронту та змінюється з поширенням. Визначено, що часовий центр спочатку знаходиться на нескінченності позаду площини збудження, що відповідає пласкому фронту у ближній зоні доки дифракційне поширення ще не задіяне. Далі з поширенням хвилі її центр кривизни (часовий центр) наближується до площини збудження та перетинає її виходячи на сталий рівень десь на відстані 6-7 поперечних розмірів пучка попереду від площини збудження. У той же час встановлено, що амплітудний центр завжди знаходиться позаду площини, зі зменшенням поперечних розмірів пучка він очікувано наближується до площини збудження (перехід до точкового джерела). Проведений аналіз може бути застосовано для компактного та при цьому достатньо точного опису полів імпульсних антен у ближній та середній зоні.

6. Отримано в явному вигляді вирази для операторів дифракції типу згортки, що описують зміну хвильової форми модової амплітуди при дифракції на плоскій межі розділу двох магніто-діелектричних провідних середовищ у хвилеводі. Визначено формули для особливих випадків: ізоімпедансних середовищ, ізорефракційних середовищ. Установлено, що для межі ізоімпедансних середовищ нульовою виявляється миттєва частина операторів дифракції, однак резонансний «хвіст» залишається. У той же час на межі ізорефракційних середовищ резонансна частина дорівнює нулю, є лише миттєве перетворення зі збереженням часової форми хвилі та зміною амплітуди.
7. Проаналізовано фізичні ефекти, які виникають при падінні імпульсної Е-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. На основі попередньо отриманих операторів дифракції для цього випадку у аналітичному вигляді отримано також оператори, що дозволяють обчислювати часові залежності поверхневого заряду та хвилі об'ємного заряду, що виникає за межею. 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. Проаналізовано випадки збудження імпульсом та циклом, що призводить до експоненційного та коливального режимів відповідно.
8. Запропоновано числово-аналітичний метод розв'язання задач хвилевідної дифракції на основі модових перерозкладань безпосередньо у часовій області. Цей метод (узгодження мод) є одним з широко застосованих у частотній області методів вивчення дифракції на скачках хвилеводів, що мають нульовий об'єм. Його суть полягає у розкладанні полів на апертурі та на фланці за системою мод вузької та широкої частини хвилеводу та проектуванні на інший базис хвиль. Це призводить до матричного формулювання граничних умов. У частотній області це матричне рівняння має виконуватись на кожній частоті спектру. Натомість, у запропонованому підході встановлено аналогічний матричний зв'язок, що використовується для зшивання полів у кожний момент часу при моделюванні поширення хвилі. За допомогою цього методу, зокрема, було досліджено випромінювання імпульсної хвилі простими конфігураціями імпульсних антен, наприклад, біконі-

чною антеною. Така антена може розглядатись як стик біконічної лінії, в якій є свій набір окремих мод, з вільним простором, в якому поширюються сферичні гармоніки. Отримані результати було також порівняно з дуже схожим за топологією процесом дифракції імпульсної хвилі на стику коаксіального та круглого хвилеводів. Результати було порівняно із моделюванням відомими методами та підтверджено їх достовірність. Підкреслено переваги запропонованого підходу над прямими числовими методами.

9. Проведено фізичний аналіз аномального поглинання у тонких провідних дротах, коли перетин поглинання на кілька порядків (наприклад, майже до  $10^5$  у максимумі для мідного дроту радіусом 2 мкм) перевищує геометричні розміри об'єкту, цей ефект є надширокосмуговим. Запропоновано та проаналізовано фізичну модель, що враховує послідовно ввімкнені резистивне та індуктивне навантаження. Результати порівнювались з точною формулою, яку отримано розкладанням пласкої хвилі на циліндричні хвилі та точним врахуванням граничних умов. Ця 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 дроту. Проведений фізичний аналіз дає можливість більш ефективно створювати поглинаючі структури на основі цього ефекту. Наприклад, встановлена залежність поглинання від індуктивності дозволила запропонувати конфігурації з дротів у вигляді гвинтових ліній або біфілярних гвинтових ліній для зниження індуктивності та посилення ефектів поглинання. На основі цього явища можливо створення ефективних нерезонансних широкосмугових поглиначів для застосування у безлунових камерах, задачах маскування від радіолокаційного визначення, забезпечення електромагнітної сумісності тощо.
10. На основі розкладань полів за тейлорівськими модами запропоновано нові методи просторової фільтрації для розв'язання зворотних задач магнітостатики при вимірюванні полів від локальних джерел за допомогою решітки датчиків за наявності сильних віддалених джерел завад. Крім того, було також побудовано методи фільтрації на основі методу власних ортогональних мод, який дозволяє за допомогою числового моделювання оцінювати матриці коваріації впливу локальних та віддалених джерел. На основі числового моделювання проведено порівняння та виявлено найбільш відповідні методи фільтрації та конфігурації магнітокардіографічної вимірювальної системи з оглядом на неідеальність датчиків. Встановлено, що, наприклад, для проаналізованої конфігурації датчиків, при рівні шуму в 100 дБ можливе визначення координат диполу, що знаходиться на глибині 10 см з точністю 0,12 см при використанні тейлорівської фільтрації другого порядку та з точністю 0,004 см при використанні фільтрації 3-го порядку. Точність визначення компонент диполу складає 4 % та 0,16 % відповідно.
11. Метод частотної фільтрації сигналів за умови наявності апріорної оцінки спектру сигналу був удосконалений за рахунок нестационарності фільтрації, коли спектральна функція фільтру змінюється у часі та накладається на віконне перетворення Фур'є сигналу, що фільтрується. Продемонстровано ефективність такого підходу на прикладі кардіосигналів у магнітокардіографії. Наприклад, в число-



вому експерименті використовувався на вході магнітокардіографічний сигнал з рівнем шуму 0 дБ. На виході стаціонарна фільтрація забезпечила рівень сигнал/шум біля 11,5 дБ, у той час як нестационарна фільтрація забезпечила на 4 дБ кращий рівень у 15,3 дБ.

12. Розроблені методи просторової та часової фільтрації для магнітокардіографії мають суттєве практичне значення, оскільки дозволяють створювати МКГ системи з використанням більш дешевих і доступних ферозондових датчиків, які здатні працювати при кімнатній температурі, на відміну від надпровідних інтерференційних датчиків. Це дозволить зробити технологію МКГ діагностики більш доступною для клінічної практики. В рамках міжнародного проекту CRDF автором було розроблено програмне забезпечення для розв'язання зворотних задач у традиційних системах на основі кріогенних надпровідних датчиків магнітного поля. Зараз на кафедрі теоретичної радіофізики ХНУ йде робота за участю автора щодо створення прототипу магнітокардіографічної системи з використанням ферозондових датчиків, що працюють при кімнатній температурі. Розроблені в дисертації методи виявились дуже доречними на етапі планування дослідження (для визначення досяжності мети розробки), на поточному етапі оптимізації параметрів установки, та знадобляться в подальшому для розробки алгоритмів обробки інформації.

**Перспективні напрямки подальших досліджень:** застосування методу модового базису для аналізу поширення імпульсних сигналів у диспергуючих, нелінійних, нестационарних середовищах; розвиток модових розкладань для секторіального хвилеводу (поширення в радіальному напрямку в циліндричній геометрії) та для імпульсних хвиль на клиноподібних структурах; розвиток методів аналізу нерегулярних хвилеводів на основі запропонованих модових розкладань у часовій області; застосування розробленого нещодавно більш розвинутого математичного апарату для вдосконалення модових перерозкладань у часовій області; створення й аналіз нових резонансних конічних структур на основі виявленого ефекту імпульсної поверхневої хвилі; створення й аналіз поглинаючих структур з тонких дротів у більш складних геометричних конфігураціях.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

Наукові праці (статті у фахових журналах), в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Бутрым А. Ю. Сравнение двух методов локализации источника магнитного поля в задачах магнитокардиологии / А. Ю. Бутрым, Ю. В. Дурнева, С. Н. Шульга // Радиопизика и радиоастрономия. – 2006. – Том 11, № 4. – С. 397-404.
2. Кочетов Б. А. Моделирование голографического радара с дискретной и непрерывной апертурой / Б. А. Кочетов, А. Ю. Бутрым // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. № 712 – “Радиофізика та електроніка”. – 2006. – Вип. №10. – С. 76-79.
3. Butrym A. Yu. Resistive Loading that Does not Reduce Performance of a Pulse Antenna / A. Yu. Butrym, N. N. Kolchigin, S. N. Pivnenko // Electromagnetic Phenomena. – 2007. – Vol. 7, No. 1(18). – P. 71-76.

4. Butrym A. A Tapered Coplanar Strip Antenna with Improved Matching / A. Butrym, S. Pivnenko // Chapter 38 in Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics 7 book (ISBN: 9780387377285) / F. Sabath, E. L. Mokole, U. Schenk, D. Nitsch (Eds.). – Berlin: Springer, 2007. – P. 344-355.
5. Bagatskaya O. One-dipole inverse problem of magnetostatics for reconstruction of heart-torso electric activity from magnetocardiography measurements / O. Bagatskaya, A. Butrym, Yu. Durneva, S. Shulga // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. № 756 – “Радіофізика та електроніка”. – 2007. – Вип. 11. – С. 47-50.
6. Багацька О. В. Новий метод локалізації джерела магнітного поля в задачах магнітокардіографії / О. В. Багацька, О. Ю. Бутрим, Ю. В. Дурнева, С. М. Шульга // Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки. – 2007. – Вип. 1. – С. 212-217.
7. Дурнева Ю. В. Сравнение характеристик чувствительности датчиков магнитного поля на основе программно реализуемых градиометров разного порядка для магнітокардіографических измерений / Ю. В. Дурнева, А. Ю. Бутрим, С. Н. Шульга // Радиофізика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 12, №4. – С. 433-439.
8. Durneva Yu. V. A model of several dipoles in free space in the primary processing of magnetocardiographic data / Yu. V. Durneva, A. Yu. Butrym, S. N. Shul'ga // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2008. – Volume 53, Issue 11. – P. 1339-1344.
9. Бутрим А. Ю. Метод модового базиса для открытых диэлектрических структур / А. Ю. Бутрим, М. Н. Легенький // Вестник ХНУ, Серия “Радіофізика и електроніка”. – 2008. – № 806. – С. 44-47.
10. Бутрим А. Ю. Метод модового базиса во временной области для волновода с поперечно неоднородным многосвязным сечением. 1. Общая теория метода / А. Ю. Бутрим, Б. А. Кочетов // Радиофізика и радиоастрономия. – 2009. – Том 14, № 2. – С. 162-173.
11. Бутрим А. Ю. Метод модового базиса во временной области для волновода с поперечно неоднородным многосвязным сечением. 2. Пример применения метода / А. Ю. Бутрим, Б. А. Кочетов // Радиофізика и радиоастрономия. – 2009. – Том 14, № 3. – С. 266-277.
12. Butrym A. Y. Charge transport by a pulse e-wave in a waveguide with conductive medium / A. Y. Butrym, M. N. Legenkiy // Progress in Electromagnetics Research B. – 2009. – Vol. 15. – P. 325-346.
13. Antyufeyeva M. S. Transient electromagnetic fields in a cavity with dispersive double negative medium / M. S. Antyufeyeva, A. Y. Butrym, O. A. Tretyakov // Progress in Electromagnetics Research M. – 2009. – Vol. 8. – P. 51-65.
14. Durneva Yu. V. Spatial noise filtering in magnetocardiographic measurements / Yu. V. Durneva, A. Yu. Butrym, S. N. Shul'ga // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2009. – Volume 54, Issue 11. – P. 1292-1297.
15. Костев А. Ю. Определение оптимальных параметров измерительной магнітокардіографической гексагональной решетки / А. Ю. Костев, А. Ю. Бутрим,

- С. Н. Шульга // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Серія "Радіофізика та електроніка". – 2009. – №883, випуск 15. – С. 25-29.
16. Butrym A. Yu. Mode Expansion in Time Domain for Conical Lines with Angular Medium Inhomogeneity / A. Yu. Butrym, B. A. Kochetov // Progress in Electromagnetics Research B. – 2010. – Vol. 19. – P. 151–176.
17. Legenkiy M. N. Method of mode matching in time domain / M. N. Legenkiy, A. Y. Butrym // Progress In Electromagnetics Research B. – 2010. – Vol. 22 – P. 257-283.
18. Легенький М. Н. Расчет импульсного излучения круглой диэлектрической стержневой антенны методом согласования мод во временной области / М. Н. Легенький, А. Ю. Бутрым, Н. Н. Колчигин // Радиотехника. – 2010. – Вып. 162. – С. 5-12.
19. Legenkiy M. Pulse signals in open circular dielectric waveguide / M. Legenkiy, A. Butrym // Progress in Electromagnetics Research Letters. – 2011. – Vol. 22. – P. 9-17.
20. Shi He. Interaction of Electromagnetic Waves in a Waveguide with Very Thin Wires / Shi He, S. N. Shulga, N. G. Kokodiy, N. N. Gorobets, V. I. Kiiko, A. Yu. Butrym, Yu Zheng // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2011. – Volume 56, Issue 10. – P. 1193-1196.
21. Легенький М. Распространение нестационарного электромагнитного поля в диэлектрическом волноводе / М. Легенький, А. Бутрым // Физические основы приборостроения. – 2012. – Т. 1, №1. – С. 23-35.
22. Бутрым А. Ю. Использование сопровождающего окна в методе BOR-FDTD для расчёта поведения предвестника в диэлектрическом волноводе / А. Ю. Бутрым, Е. О. Коломиец, М. Н. Легенький // Вісник Харківського національного університету, серія: фізична «Ядра, частинки, поля». – 2012. – № 54. – С. 139-141.
23. Kochetov B. A. Axially symmetric transient electromagnetic fields in a radially inhomogeneous biconical transmission line / B. A. Kochetov, A. Y. Butrym // Progress in Electromagnetics Research B. – 2013. – Vol. 48. – P. 375-394.
24. Legenkiy M. N. Excitation and propagation of a fast pulse guided wave in a circular dielectric waveguide / M. N. Legenkiy, A. Yu. Butrym // Радиофізика и радиоастрономия. – 2013. – Т. 18, № 2. – С. 147–151.
25. Бутрым А. Ю. Построение полюсной модели дисперсии диэлектрика на основе результатов измерений показателя преломления и показателя поглощения в ограниченной полосе частот / А. Ю. Бутрым, М. С. Антюфеева, В. В. Хардіков, С. Н. Шульга // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. № 1067 – "Радіофізика та електроніка". – 2013. – Вып. 22. – С. 3-9.
26. Legenkiy M. N. Physical Features of Mode Basis in Open Dielectric Structures with Discrete and Continuous Spectrum / M. N. Legenkiy, A. Y. Butrym // Telecommunications and Radio Engineering. – 2014. – Vol. 73, Iss. 10. – P. 863-880.
- Опубліковані праці **апробаційного** характеру (тези міжнародних конференцій):
27. Butrym A. Processing band-limited antenna measurements to reconstruct antenna impulse response on example of resistively loaded Vivaldi antenna / A. Butrym, S. Pivnenko, N. Kolchigin // Proc. of the First European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2006), 6-10 November 2006, Nice (France). – 2006. – P. 1-5.

28. Butrym A. Charge Transport by a Pulse E-Wave in a Waveguide Filled with Conductive Medium / A. Butrym, M. Lyogenkiy, Yu Zheng // Proc. of the Third International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'06), 18-22 September 2006, Sevastopol (Ukraine). 2006. – P. 285-288.
29. Butrym A. Time and Amplitude Centre of an Impulse Wavebeam / A. Butrym, Yu Zheng // Proc. of the Third International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'06), 18-22 September 2006, Sevastopol (Ukraine). 2006. – P. 350-352.
30. Bagatskaya O. Two-dipole inverse problem of magnetostatics for reconstruction of heart electric activity from magnetocardiography measurements / O. Bagatskaya, A. Butrym, Yu. Durneva, S. Shulga, V. Tuz // Proc. of the 11<sup>th</sup> International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET'06), 26-29 June 2006, Kharkiv (Ukraine). – 2006. – P.132-134.
31. Butrym A. Yu. Mode Basis Method for Spherical TEM-Transmission Lines and Antennas / A. Yu. Butrym, B.A. Kochetov // Proc. of the 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'07), 17-21 September 2007, Sevastopol (Ukraine). – 2007. – P. 243-245.
32. Butrym A. Yu. Comparison of absorbing boundary conditions for numerical analysis of periodic structures / A. Yu. Butrym, M. N. Legenkiy // Proc. of the 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'07), 17-21 September 2007, Sevastopol (Ukraine). – 2007. – P. 239-242.
33. Butrym A. Yu. Sensitivity characteristics of different configurations of software gradiometers used in magnetocardiography / A. Yu. Butrym, Yu. D. Durnyeva, S. N. Shulga // Proc. of the 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'07), 17-21 September 2007, Sevastopol (Ukraine). – 2007. – P. 317-319.
34. Butrym A. Transient spherical wave front steadying in the near zone of an antenna / A. Butrym, Zheng Yu // Proc. of the 6th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'07), 17-21 September 2007, Sevastopol (Ukraine). – 2007. – P. 246.
35. Butrym A. Yu. Absorbing Boundary Condition for FDTD Modeling of Waveguides with Lossy Medium / A. Yu. Butrym, M. N. Legenkiy // Proc. of the Sixth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves and Workshop on Terahertz Technologies (MSMW'07), 25-30 June 2007, Kharkov (Ukraine). – 2007. – P. 298-300.
36. Kochetov B. A. Calculation of Pulse Wave Propagation in a Quasi-TEM Line Using Mode Expansion in Time Domain / B. A. Kochetov, A. Yu. Butrym // Proc. of the 4th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'08), 15-19 September 2008, Sevastopol (Ukraine). – 2008. – P. 222–224.
37. Antyufeyeva M. S. Transient oscillations in a cavity with dispersive double negative medium / M. S. Antyufeyeva, A. Yu. Butrym, O. A. Tretyakov // Proc. of the 4th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'08), 15-19 September 2008, Sevastopol (Ukraine). – 2008. – P. 252-254.
38. Legenkiy M. N. Mode-matching in Time Domain / M. N. Legenkiy, Zheng Yu, A. Yu. Butrym // Proc. of the 4th International Conference on Ultrawideband and



- Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'08), 15-19 September 2008, Sevastopol (Ukraine). – 2008. – P. 225-227.
39. Kochetov B. Some Exact Solutions of Transient Problems of Electrodynamics in Spherical Coordinate System Obtained by Symmetry Analysis of Klein-Gordon-Fock Equation / B. Kochetov, A. Butrym // Proc. of the 12th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET'08), June 29 2008-July 2 2008, Odessa (Ukraine). – 2008. – P. 291–293.
  40. Legenkiy M. Mode basis method for open dielectric waveguides / M. Legenkiy, A. Butrym // Proc. of the 12th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET'08), June 29 2008-July 2 2008, Odessa (Ukraine). – 2008. – P.392-394.
  41. Butrym A. Application of optimal spatial filtering to measuring magnetic fields of local sources / A. Butrym, Yu. Durneva, S. Shulga // Proc. of the 12th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET'08), June 29 2008-July 2 2008, Odessa (Ukraine). – 2008. – P.412-414.
  42. Antyufeyeva M. S. Microwave Oscillations in a Cavity with Dispersive Double Negative Medium / M. S. Antyufeyeva, A. Yu. Butrym, O. A. Tretyakov // Proc. of the 2008 Microwaves Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2008), 22-24 September 2008, Kiev (Ukraine). – 2008. – P. 105-107.
  43. Butrym A. Yu. Numerical analysis of simple TEM conical-like antennas using mode matching in time domain / A. Yu. Butrym, B. A. Kochetov, M. N. Legenkiy // Proc. of the 3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2009), 23-27 March 2009, Berlin (Germany). – 2009. – P.3471-3475.
  44. Legenkiy M. N. Mode basis construction for open dielectric circular waveguide by integral equation method / M. N. Legenkiy, A. Yu. Butrym // Proc. of the 2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'10), 21-26 June 2010, Kharkov (Ukraine). – 2010. – P. 1-3.
  45. He Shi. Interaction of electromagnetic waves in a waveguide with very thin wires / Shi He, S. N. Shulga, N. G. Kokodiy, N. N. Gorobets, V. I. Kiiko, A. Y. Butrym // Proc. of the 2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'10), 21-26 June 2010, Kharkov (Ukraine). – 2010. – P. 1-3.
  46. Legenkiy M. Modeling pulse radiation of rod antenna by method of mode matching in time domain / M. Legenkiy, A. Butrym // Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET'10), 6-8 September 2010, Kyiv (Ukraine). – 2010. – P. 1-4.
  47. Kochetov B.A. Transient Wave Propagation in Radially Inhomogeneous Biconical Line / B.A. Kochetov, A.Yu. Butrym // Proc. of the 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'10), 6-10 September 2010, Sevastopol (Ukraine). – 2010. – P. 71-73.
  48. Legenkiy M. N. Impulse signal propagation in open dielectric circular waveguide / M. N. Legenkiy, A. Yu. Butrym // Proc. of the 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'10), 6-10 September 2010, Sevastopol (Ukraine). – 2010. – P. 119-121.

49. Butrym A. Yu. Mode expansions in time domain / A. Yu. Butrym // Proc. of the 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'10), 6-10 September 2010, Sevastopol (Ukraine). – 2010. – P. 49-51.
50. Legenkiy M. Moving frame BOR-FDTD approach for long time simulation of pulse precursor propagation in a dielectric waveguide / M. Legenkiy, A. Butrym // Proc. of the 2012 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET'12), 28-30 Aug. 2012, Kharkiv (Ukraine). – 2012. – P.172-175.
51. Butrym A. Yu. Properties of pulse surface waves in a dielectric waveguide / A. Yu. Butrym, M. N. Legenkiy // Proceedings of the International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'12), 17-21 September 2012, Sevastopol (Ukraine). – 2012. – P. 309-311.
52. Kostiev A. Y. Time-varying wiener filtering based on short-time Fourier transform / A. Y. Kostiev, A. Y. Butrym, S. N. Shulga // Proceedings of the International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'12), 17-21 September 2012, Sevastopol (Ukraine). – 2012. – P. 305-308.
53. Butrym A. Yu. Effects of TEM-horn antenna tapering / A. Yu. Butrym, M. N. Legenkiy, XiangYu Hao // Proceedings of the International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'12), 17-21 September 2012, Sevastopol (Ukraine). – 2012. – P. 215-217.
54. Butrym A. Y. Anomalous wideband absorption in ultrathin copper wires / A. Y. Butrym, V. V. Zhurbenko // Proceedings of the International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'12), 17-21 September 2012, Sevastopol (Ukraine). – 2012. – P. 317-318.
55. Kochetov B. A. Rigorous calculation of ultra short pulse propagation in a shielded microstrip line using coupled mode expansion in time domain / B. A. Kochetov, A. Y. Butrym // Proceedings of the International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'12), 17-21 September 2012, Sevastopol (Ukraine). – 2012. – P. 284-287.
56. Butrym A. Yu. Mode expansions in time domain / A. Yu. Butrym // Proceedings of the International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'12), 17-21 September 2012, Sevastopol (Ukraine). – 2012. – P. 47-50.
57. Legenkiy M. N. About possibility to create a small antenna based on inhomogeneous biconical line / M. N. Legenkiy, A. Yu. Butrym, M. S. Sharkova // Proc of the 2013 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'13), 23-28 June 2013, Kharkov (Ukraine). – 2013. – P. 470-472.
58. Legenkiy M. N. Fast pulse guided wave in an optical waveguide / M. N. Legenkiy, A. Yu. Butrym // Proc of the 2013 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'13), 23-28 June 2013, Kharkov (Ukraine). – 2013. – P. 207-209.
59. Legenkiy M. N. Excitation of fast pulse guided wave in receiving dielectric rod antenna / M. N. Legenkiy, A. Yu. Butrym // Proc. of the IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'13), 16-20 Sept. 2013, Odessa (Ukraine). – 2013. – P. 444-446.

60. Legenkiy M. Evaluation of On-Ground Object Radar Detectability Reduction / Maxim Legenkiy, Alexander Butrym, Mariya Antyufeyeva // Proceedings of the 2014 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET'14). – 2014. – P. 254-257.
61. Legenkiy M. N. Diffraction of a Pulse Electromagnetic TM wave on lossy layer in a waveguide / M. N. Legenkiy, A. Yu. Butrym // Proceedings of the conference Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'14), 15-19 September 2014, Kharkiv (Ukraine). – 2014. – P. 104-107.
62. Butrym A. Yu. Time domain analysis of transient radiation of dipole in dielectric sphere / A. Yu. Butrym, M. N. Legenkiy // Proc. of the X International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'15), 21-24 April 2015, Kharkiv (Ukraine). – 2015. – P. 1-3.

Опубліковані праці, які **додатково** відображають наукові результати дисертації:  
**додаткові статті у фахових журналах:**

63. Джин Юн. Конечно-разностная схема во временной области и аналитическое решение уравнения Клейна-Гордона / Джин Юн, Б. А. Кочетов, А. Ю. Бутрым // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. № 712 – “Радіофізика та електроніка”. – 2006. – Вип. №10. – С. 91-94.
64. Butrym A. CPW to CPS Transition for Feeding UWB Antennas / A. Butrym, S. Pivnenko // IEEE Aerospace and Electronic Systems. – 2006. – Vol. 21, No. 2. – P. 21-23.
65. Думин А. Н. Нестационарные электромагнитные поля в неограниченном пространстве с произвольным заполнением идеальной средой / А. Н. Думин, О. А. Думина, А. Ю. Бутрым, О. А. Третьяков // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. № 756 – “Радіофізика та електроніка”. – 2007. – Вип. 11. – С. 61-64.
66. Дурнева Ю. В. Использование модели нескольких диполей в свободном пространстве для первичной обработки результатов магнитокардиографических измерений / Ю. В. Дурнева, А. Ю. Бутрым, С. Н. Шульга // Радиотехника и электроника. – 2008. – Том 53, №11. – С. 1420-1425.
67. Кочетов Б. А. О сходимости модовых разложений по сферическим гармоникам во временной области / Б. А. Кочетов, А. Ю. Бутрым // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна Серія “Радіофізика та електроніка”. – 2009. – №883, випуск 15. – С. 41-44.
68. Легенький М. Н. Построение модового базиса для открытых диэлектрических структур методом интегральных уравнений / М. Н. Легенький, А. Ю. Бутрым // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна Серія “Радіофізика та електроніка”. – 2009. – №883, випуск 15. – С. 50-53.
69. Дурнева Ю. В. Пространственная фильтрация шумов в магнитокардиографических измерениях / Ю. В. Дурнева, А. Ю. Бутрым, С. Н. Шульга // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т.54, №11. – С. 1362-1368.
70. Хе Ши. Взаимодействие электромагнитных волн в волноводе с очень тонкими проволочками / Хе Ши, С. Н. Шульга, Н. Г. Кокодий; Н. Н. Горобец, В. И. Кийко, А. Ю. Бутрым, Джин Юн // Радиотехника и электроника. — 2011. — Т. 56, № 10. — С. 1201-1204.

**додаткові тези українських конференцій:**

71. Джин Юн. Анализ в ближней зоне поля импульсного волнового пучка, создаваемого гауссовым распределением линейно поляризованных токов на плоскости / Юн Джин, А. Ю. Бутрым // 2-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2005. Сборник научных трудов. Том V. Международная конференция «СВЧ и оптоэлектроника». – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. – 2005. – С. 47–50.
72. Кочетов Б. А. Верификация метода модового базиса для многосвязных поперечно-неоднородных волноводов / Б. А. Кочетов, А. Ю. Бутрым // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций: 3-я междунар. молодёжная науч.-техн. конф., 16-21 апр. 2007 г.: тезисы докл. – Севастополь, 2007. – С. 301.
73. Кочетов Б. А. Точные решения одномерного уравнения Клейна-Гордона-Фока с произвольным параметром для нестационарных задач электродинамики в сферической системе координат / Б. А. Кочетов, А. Ю. Бутрым // Тезисы докладов на 7-й Харьковской конф. молодых учёных «Радиофизика и электроника» (YSC 2007), 12-14 декабря 2007, Харьков. – 2007. – С. 114.
74. Бутрым А. Эффективные модовые поглощающие условия для FDTD / А. Бутрым, М. Легенький // Тезисы докладов на 7-й Харьковской конф. молодых учёных «Радиофизика и электроника» (YSC 2007), 12-14 декабря 2007, Харьков. – 2007. – С. 115.
75. Кочетов Б. А. Классификация собственных мод в поперечно-неоднородных волноводах / Б. А. Кочетов, А. Ю. Бутрым // Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке: 12-й междунар. молодёжный форум, 1-3 апр. 2008 г.: тезисы докл. – Харьков, 2008. – С. 14.
76. Кочетов Б. А. Распространение импульсных волн в радиально-неоднородных несимметричных биконических линиях / Б. А. Кочетов, А. Ю. Бутрым // Тезисы докладов на 8-й Конф. молодых учёных «Радиофизика, Электроника и Биофизика» (YSC 2008), 25-27 ноября 2008, Харьков. – 2008. – С. 130.
77. Бутрым А. Решение задачи импульсного излучения из открытого конца волновода методом согласования мод во временной области / А. Бутрым, М. Легенький // Тезисы докладов на 8-й Конф. молодых учёных «Радиофизика, Электроника и Биофизика» (YSC 2008), 25-27 ноября 2008, Харьков. – 2008. – С. 131.

**АНОТАЦІЯ**

**Бутрим О. Ю. Застосування модових розкладань у широкосмугових задачах електродинаміки.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, 2015.

Досліджується коло питань, що поєднані концепцією розкладання електромагнітних полів у суперпозицію просторових конфігурацій – «мод», причому розгляд проводиться у часовій області, що дозволяє ефективно досліджувати широкосмугові процеси. Створено новий науковий напрямок дослідження хвилеведучих систем з



поперечно-неоднорідним заповненням у різноманітних конфігураціях шляхом побудови методів модових розкладань у часовій області на основі підходу часткового розділення змінних у рівняннях Максвелла. Метод застосовано для побудови аналітично-числових схем розв'язання цілої низки задач у циліндричній та конічній геометрії границь та для відкритих структур. На основі модових перерозкладань полів у часовій області створено числово-аналітичний метод моделювання задач дифракції імпульсних сигналів на стиках хвилеводів. Виявлено та проаналізовано кілька нових фізичних явищ: імпульсна поверхнева хвиля, що поширюється вздовж діелектричного хвилеводу зі швидкістю світла у вільному просторі, зберігаючи при цьому свою просторову структуру; коливання поверхневого та просторового зарядів при падінні імпульсної Е-хвилі на межу провідного середовища у хвилеводі; аномальне поглинання у тонких провідних дротах. Розроблено також низку методів просторової та часової фільтрації сигналів у задачах магнітокардіографії.

**Ключові слова:** неоднорідний хвилевід, часова область, метод модового базису, надширокополосні сигнали, імпульсні сигнали, імпульсне випромінювання, просторова фільтрація, магнітокардіографія.

## АННОТАЦІЯ

Бутрым А. Ю. **Использование модовых разложений в широкополосных задачах электродинамики.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, 2015.

Диссертационная работа посвящена исследованию круга вопросов, объединённых концепцией разложения электромагнитных полей в суперпозицию пространственных конфигураций – «мод», причём рассмотрение проводится во временной области, что позволяет эффективно рассматривать широкополосные процессы.

Создано новое научное направление исследования волноводных систем с поперечно-неоднородным заполнением в различных конфигурациях путём построения модовых разложений во временной области на основе общего подхода частичного разделения переменных в уравнениях Максвелла. Изучаются процессы возбуждения и распространения импульсных сигналов в различных регулярных волноводящих структурах, дифракции на сочленениях таких структур. Поля представляются в виде разложения по модам, с амплитудами, которые являются функциями времени и продольной координаты. Модовые амплитуды удовлетворяют системе связанных эволюционных уравнений, позволяющей определить изменение временной формы модовых сигналов при распространении вдоль структуры. Построенный метод позволяет рассматривать структуры с поперечно неоднородным заполнением волновода, когда моды в частотной области являются частотно зависимыми и не допускают прямого переноса во временную область с сохранением факторизованного разложения на моды и амплитуды. Это достигается за счёт введения в рассмотрение операторов дифференцирования по поперечным координатам, в которые входит неоднородность распределения электромагнитных свойств среды в поперечном сечении. Операторы оказываются самосопряжёнными в специально определённом функцио-

нальном пространстве, что позволяет рассматривать для них задачу на собственные значения и использовать их собственные функции (моды) в качестве базиса для разложения искоемых полей. Вводимые «моды» являются связанными, возбуждение одной моды приводит к возникновению других мод при распространении. Численные эксперименты показали, что для сигналов с ограниченным спектром достаточно учитывать конечное количество связанных мод, высшие моды возбуждаются с экспоненциально малыми амплитудами.

Описанный подход применён в диссертации для рассмотрения полей в цилиндрических закрытых волноводах произвольного многосвязного сечения, в конических волноводах, в свободном пространстве: в сферической (волны от сосредоточенного источника) и цилиндрической (волновые пучки) геометриях, в открытом диэлектрическом волноводе. Получен ряд аналитических результатов, разработаны численные схемы для решения более общих задач.

Решено несколько задач о дифракции, которые могут быть сформулированы как дифракция на стыке регулярных волноводов. Для этого известный в ЧО метод согласования мод сформулирован и применён непосредственно во временной области. На основе такого подхода рассмотрена, например, задача об излучении биконической антенны, как задача о дифракции на сопряжении конического волновода (антенны), в котором возбуждается волна, и свободного пространства, рассматриваемого тоже как конический волновод.

С помощью разработанных методов проведено численное моделирование, физический анализ и интерпретация полученных результатов для нескольких нестационарных волновых процессов. Проанализировано возбуждение колебаний поверхностного и объёмного заряда при падении Е-волны на границу проводящей среды в волноводе. При рассмотрении импульсного возбуждения открытого диэлектрического волновода выявлена и проанализирована структура волны-предвестника. Показано, что возникающая импульсная поверхностная волна формирует структуру в виде конических фронтов, распространяющихся под критическим углом к поверхности диэлектрика. Механизм их возникновения схож с черенковским излучением: поверхностная волна, двигаясь вдоль границы диэлектрика со скоростью света в свободном пространстве, создает излучение вглубь диэлектрика, в котором скорость света ниже. Такая волновая структура двигается вдоль диэлектрического волновода со скоростью света в свободном пространстве, причём скелет пространственной структуры в виде конусов практически не изменяется по ходу распространения.

Рассмотрена задача о пространственной фильтрации в мультисенсорных системах измерения магнитных полей: выделении слабого сигнала от локального источника магнитного поля на фоне сильных помеховых сигналов от удалённых источников с помощью системы магнетометров, разнесённых в пространстве в виде измерительной решётки. В магнитокардиографии необходимо выделить слабый магнитный сигнал от сердца пациента на очень сильном фоне, создаваемом удалёнными источниками шума. Используется метод «собственных ортогональных мод», основанный на использовании сингулярного разложения матриц сигналов. В результате получают оценки матриц ковариации, описывающие ожидаемый полезный сигнал и шум от внешних источников. Используется разложение непрерывного поля по тейлоровским модам,

при этом высшие пространственные производные от поля, создаваемого компактным источником, убывают с расстоянием от источника по степенному закону с показателем, соответствующим степени производной. Классы тейлоровских мод с разными степенями производных дискретизируются на решетке датчиков, позволяя ввести подпространства с различными законами убывания чувствительности с расстоянием до источника. Сравнивается эффективность таких подходов при использовании разного типа датчиков, включая неидеальные градиометры. Рассмотрена частотно-временная фильтрация на основе оконного преобразования Фурье. Зашумленность разных измерительных каналов, соответствующих одному физическому процессу, может существенно различаться: шумы в канале электрокардиограммы обычно на порядок ниже шумов в магнитокардиограмме, поэтому информацию об амплитудной части моментального спектра полезного сигнала ЭКГ можно использовать для фильтрации частотного содержания в зашумленных каналах МКГ.

**Ключевые слова:** неоднородный волновод, временная область, метод модового базиса, сверхширокополосные сигналы, импульсные сигналы, импульсное излучение, пространственная фильтрация, магнитокардиография.

## SUMMARY

Butrym A. Yu. **Mode expansions in wideband problems of electromagnetics.** – Manuscript.

Thesis for Doctor of Science degree in Physics and Mathematics with the specialization in 01.04.03 – Radiophysics. – Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2015.

The thesis is devoted to issues united by the concept of electromagnetic field expansion into superposition of spatial configurations – «modes». The consideration is performed in the time domain that allows studying ultrawideband processes (pulse signals) in natural and efficient way. A new scientific field of research was developed for studying wave guiding systems with transverse inhomogeneous filling in different configurations by building methods for mode expansions in time domain based on a more general technique of partial variables separation in Maxwell equations. The new method was applied to build analytic-numerical schemes for solving a row of problems in cylindrical and conical arrangements and for open waveguide structures. A new numerical-analytical method based on mode matching in time domain is proposed for modeling processes of pulse signal diffraction on waveguide junctions. Several new physical effects were revealed and analyzed: a pulse surface wave, that propagates along a dielectric waveguide with a speed of light in free space keeping its spatial skeleton unchanged; oscillations of surface and volumetric charges that occur under incidence of pulse E-wave on interface of conducting medium in a waveguide; anomalous absorption in thin conducting filaments. Several new methods for spatial and time-frequency filtering signals that are met in problems of magnetocardiography are proposed.

**Key words:** inhomogeneous waveguide, Time Domain, Mode Basis Method, ultrawideband signal, pulse signal, pulse radiation, spatial filtering, magnetocardiography.