

ВІДГУК

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

Актуальність теми дисертації. Дисертацію О. Ю. Бутрима присвячено розвитку методів електродинамічного аналізу різних хвилевідних структур. Ключова ідеологія досліджень базується на загальній методиці часткового розділення змінних у рівняннях Максвелла і орієнтована на вивчення нестационарних електродинамічних процесів. Вперше задачі поширення імпульсних сигналів у хвилеводах почали розглядатись у 1950-х роках, що було пов'язано з вивченням електромагнітного імпульсу ядерного вибуху. На початку теперішнього століття науковий інтерес до нестационарних задач відновився через суттєве покращення елементної бази для генерування сигналів. Це дозволило використовувати надширокосмугові імпульсні пристрої для локації, розпізнавання і моніторингу різних об'єктів та систем, та для розв'язання інших важливих задач прикладної фізики. Слід зазначити, що на протязі двадцятого сторіччя радіофізика переважно працювала з синусоїдальними вузькосмуговими сигналами. Отже, було створено багато ефективних методів досліджень і, відповідно, надійний математичний фундамент для вивчення поширення, дифракції та випромінювання гармонійних хвиль. Проте методи дослідження полів у часовій області, що необхідно для вивчення нестационарних процесів, в основному, розвивались шляхом побудови наближених числових методів прямого розв'язання рівнянь Максвелла. Ці методи використовували дискретизацію полів та побудову відповідних скінченних розрахункових схем, які включали апроксимацію похідних скінченними різницями, формування комірок дискретизації обчислюваного об'єму та використання функції Гріна у часовій області. У той же час проективні методи, що базуються на розкладанні полів за ортогональною системою власних функцій структури, що добре зарекомендували себе у частотній області, залишались осторонь при розв'язанні нестационарних задач через принципові складності. Отже наукова проблема – перенесення з частотної області до часової ідей та методів, що засновані на використанні модових розкладань і яку розвиває автор у своїй дисертаційній роботі, – є **актуальною** для розвитку нестационарної електродинаміки.

Про актуальність теми дисертаційної роботи свідчить і те, що дослідження проводились на кафедрі теоретичної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна у рамках кількох держбюджетних тем, у яких автор був керівником або відповідальним виконавцем, та одного міжнародного гранту. Судячи із публікацій, дослідження проводилось у період з 2006 по 2014 роки, а відповідні результати висвітлювались на міжнародних конференціях, у тому числі, на таких спеціалізованих як International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals.

Ключовим моментом дисертаційної роботи є використання методу розкладу (перерозкладу) полів за власними функціями певних крайових задач. У загально прийнятих випадках для опису полів з гармонічною залежністю від часу в однорідних або кусково-однорідних середовищах достатньо використати два скалярні потенціали, які задовольняють рівнянню Гельмгольца і граничним умовам типу Неймана і Діріхле на обмежуючій металевій поверхні. Розв'язки таких крайових задач породжують системи власних функцій, які володіють властивістю ортогональності, а отже дозволяють проводити розклади полів у відповідні ряди. При розгляді хвильових нестационарних процесів у резонансних об'ємах та хвилеводах заповнених неоднорідним діелектриком, у якому електрофізичні параметри є функціями координат і часу (розглядається факторизована залежність), для опису полів, виявляється, два скалярні потенціали недостатньо. Таких потенціалів необхідно шість і власні функції для розкладу цих потенціалів знаходяться із розв'язків попарно зв'язаних однорідних систем крайових задач з граничними умовами Неймана і Діріхле. Проте виявляється, що у зв'язку з ідеальною провідністю обмежуючих стінок, а відтак відсутністю втрат у них, ці власні функції також володіють властивістю ортогональності і дозволяють проводити відповідні розклади полів. Очевидно, що такі функції у загальному випадку мають складну структуру і їх необхідно знаходити чисельно, але важливим є те, що вони дозволяють нестационарну задачу звести до системи еволюційних рівнянь.

Основна заслуга автора полягає у тому, що він поширив цю ідеологію на складні багатозв'язні як закриті так і, що надзвичайно важливо, відкриті структури. Крім того, він розробив ефективні методи розв'язання таких рівнянь, що дозволило суттєво розширити ідеологію розкладань полів у ряди власних функцій.

Наукова новизна і цінність дисертації. У дисертації одержано ряд нових та важливих для практики результатів. Найбільш суттєвими з моєї точки зору є такі:

- На основі розвинутого автором методу модового базису для поперечно-неоднорідних середовищ створено ряд аналітичних методів, в основі яких покладено ідею розкладів

полів за власними функціями певних диференціальних операторів, що виділяються з рівнянь Максвелла і які враховують поперечну неоднорідність середовища. Постановка задач є достатньо загальною і дозволяє моделювання збудження та поширення імпульсних хвиль у широкому класі структур, що включають: закриті циліндричні хвилеводи та конічні лінії з багатозв'язним поперечним перетином, а також відкриті діелектричні хвилеводи та імпульсні пучки у вільному просторі. У всіх зазначених випадках задача допускає складну залежність матеріальних параметрів середовища від координат та часу.

- Крім створення аналітичних методів, що включає постанову граничної задачі на власні значення для мод та одержання системи еволюційних рівнянь для модових амплітуд, було також розроблено відповідні числові схеми розв'язання еволюційних рівнянь методом скінченних різниць у часовій області. Отримані числові схеми було застосовано до розрахунку конкретних простих структур з метою порівняння результатів із прямим моделюванням рівнянь Максвелла скінченими різницями у часовій області. Це було зроблено автором не лише для обґрунтування достовірності, але й для порівняння ефективності та переваг запропонованого методу.
- Ряд задач дифракції імпульсів було розв'язано в аналітичному вигляді, результати сформульовано у вигляді операторів типу згортки, що можуть бути згорнуті з довільним імпульсним сигналом і використані для аналізу дифрагованих полів. Не обмежуючись чисто теоретичними формулами, автор застосував ці результати до аналізу цікавої задачі про падіння імпульсної E-хвилі на границю провідного середовища у хвилеводі та фізично обґрунтував явища коливання поверхневого заряду та хвилі об'ємного заряду провідності.
- Вперше автором було запропоновано використовувати відомий у частотній області метод спряження полів для аналізу у часовій області задач нестационарної дифракції на стиках хвилеводів, зокрема задач випромінювання антен, які можуть бути представлені скінченим відрізком регулярної конічної лінії.
- Застосувавши розроблений метод до аналізу поширення імпульсної хвилі у діелектричному хвилеводі, автор виявив та дослідив явище формування імпульсної поверхневої хвилі. Новизна тут визначається тим, що автор проаналізував просторово-часову структуру хвилі і виявив такі її особливості, які попередні дослідження не виявляли. Крім того, надано фізичну інтерпретацію цього явища.
- Результати шостого розділу стосуються розробки методів обробки інформації у магнітокардіографічних системах вимірювання. Розв'язок цього кола задач не стосу-

ється безпосередньо методу модового базису, але також базується на проєктивних методах та ортогональному розкладанні полів за модами.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів забезпечено: використанням строгих методів, доведенням отримуваних рівнянь до числових схем та порівнянням результатів з прямим моделюванням рівнянь Максвелла методом скінчених різниць у часовій області, фізичним аналізом отримуваних сигналів та розподілів полів. Одержані результати та сформульовані висновки не суперечать існуючим фізичним уявленням.

Результати дисертаційної роботи повністю висвітлено в опублікованих 26 основних статтях, з яких 11 статей опубліковано у закордонних журналах та 1 роботу опубліковано у вигляді розділу монографії. Загалом автором по темі дисертації опубліковано 77 праць.

Наукове і практичне значення одержаних результатів. Розроблені у роботі обчислювальні методи та аналітичні розв'язки можуть бути використані при створенні програмних обчислювальних засобів для аналізу різних структур, а також для генерування, каналізації та випромінювання імпульсних сигналів. Виявлені нові фізичні ефекти поширення у діелектричних хвилеводах імпульсної поверхневої хвилі можуть стати основою для створення нових резонансних приладів, а розглянуті ефекти взаємодії імпульсних хвиль з провідними структурами можуть бути застосовані до створення ефективних поглиначів імпульсних та широкосмугових сигналів.

Таким чином дисертація Бутрима О. Ю. є закінченою науковою роботою, яка розвиває актуальний напрямок сучасної нестационарної електродинаміки. За своїм фаховим спрямуванням вона **відповідає паспорту** спеціальності 01.04.03 – радіофізика. **Зміст автореферату** дисертації у повній мірі відображає основний зміст дисертаційної роботи.

Результати кандидатської дисертації Бутрима О.Ю. не використовувались при формулюванні положень, що виносяться на захист у докторській дисертації, та фігурують лише в оглядовій частині дисертації.

Робота має високий науковий рівень, однак не позбавлена деяких **недоліків**:

1. Працюючи з нескінченими системами рівнянь, завжди виникає питання коректності їх редукції до скінченної системи. На основі числового експерименту автором

- встановлено, що модовий розклад у плоско-паралельному хвилеводі з повздовжнім діелектричним шаром достатньо швидко збігається (експоненційно, як стверджується у тексті), проте цю властивість у дисертації не обґрунтовано, а лише констатовано за наслідками одного числового експерименту. Отже узагальнювати цей висновок на інші структури слід з обережністю. При вивченні аналогічної задачі у кінчній геометрії, автором проводились числові експерименти лише для випадку вільного простору (без кутової неоднорідності середовища), при цьому говорилося лише про збіжність розв'язку до точного, а швидкість збігання вже не обговорювалась. Для відкритих структур питання збіжності виглядає ще більш складним. Автор демонструє збіжність отриманих результатів, однак питання про швидкість збігання, не досліджувалось.
2. При застосуванні методу перерозкладу у часовій області автор розглядає лише структури, які мають вигляд стрибкоподібного розширення хвилеводу, коли фланець є лише з одного боку. З наведених формулювань не зрозуміло, як ця схема буде застосовуватись до складніших структур.
 3. Хоча автор, як правило, доводить отримувані формули до числа та перевіряє результати порівнянням з відомими методами, проте для деяких результатів таку перевірку не було зроблено. Наприклад, для задачі дифракції Н-хвиль на межі магніто-діелектриків з провідністю у хвилеводі, а також для задачі дифракції поля нестационарного диполя у діелектричній сфері.
 4. При розгляді випромінювання з діелектричної сфери отримано розв'язки лише для першої Е-моди (дипольна мода для електричного диполю). Можливо, слід було сформулювати задачу у більш загальній постановці. Не зрозуміло, наскільки ускладниться задача, якщо розглянути вищі моди.
 5. Одержана у підрозділі 4.2.1 гаусова квадратура є оптимальною для гаусового спектра, але автор нічого не говорить про те, чи може вона бути застосована для інших спектральних розподілів, і які при цьому виникають похибки.
 6. Варто було б більш детально обговорити умови існування дискретного спектру у відкритих структурах. Наприклад, автором у підрозділі 4.3 розглянуто круглий діелектричний хвилевід, який характеризується неперервним спектром.
 7. Є й суто технічні зауваження. Так автором у різних місцях використовує три терміни для позначення одного й того ж методу – метод узгодження хвиль, метод зшивання, метод перерозкладу, що утруднює читання. Рисунок 2.7 у дисертації та такий же рисунок 2 в авторефераті, напевно, початково виконувався у кольорі, але після конвертації до сірого важко встановити на ньому області мінімумів та максимумів. У дисертації подекуди зустрічається дублювання системи еволюційних рівнянь у

постановці задач, хоча можна було б навести її один раз у другому розділі і надалі посилатись на неї.

Зазначені недоліки не впливають на загальну високу **позитивну оцінку** дисертаційної роботи. Отже, підсумовуючи вищесказане, вважаю, що рецензована дисертаційна робота "Застосування модових розкладань у широкосмугових задачах електродинаміки" повністю відповідає вимогам Атестаційної колегії Міністерства освіти і науки України до докторських дисертацій, а її автор Олександр Юрійович Бутрим заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Завідувач відділу фізичних основ
діагностики матеріалів ФМІ НАН України,
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,
доктор фізико-математичних наук, ст. науковий співробітник



Д.Б. Куриляк

Стігнис Д.Б. Куріляка

*Україна
НАН*

*середня
школа*



В.В. Корнів