

ВІДГУК

офіційного опонента Бутрима Олександра Юрійовича
на дисертаційну роботу Пазиніна Вадима Леонідовича
*«Модельовання і аналіз процесів пасивної та активної компресії
електромагнітних імпульсів мікрохвильового і оптичного діапазонів»*,
яку подано до захисту на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Актуальність обраної теми. Дисертаційну роботу В.Л. Пазиніна присвячено вирішенню важливої науково-прикладної проблеми строгого моделювання, аналізу та синтезу головних елементів пасивних та активних компресорів електромагнітних імпульсів (ЕМІ).

Прогрес у таких провідних царинах радіофізики, як радіолокація, передача цифрових даних, техніка прискорювачів, у значній мірі визначається збільшенням потужності/енергії ЕМІ та зменшенням їх тривалості. Можливості твердотільних та вакуумних генераторів ЕМІ не дозволяють суттєво просунутись у цьому напрямку. У роботі розробляється альтернативний напрямок — компресія ЕМІ.

У роботі розглядається як пасивна (дисперсійна), так й активна (резонансна) компресія. В основі першої з них лежить явище деформації форми та тривалості імпульсу, що поширюється у середовищі або у хвилеводному тракті через дисперсію (залежність фазової швидкості від частоти). Основу другого типу компресії складає накопичення енергії зовнішнього квазімонохроматичного джерела у резонансному об'ємі й подальше її скидання у відвідний хвилевід або у вільний простір шляхом швидкої зміни спектральних характеристик резонатора-накопичувача.

Виконаний автором у розділі 1 огляд сучасного стану теорії й техніки пасивного й активного стиснення електромагнітних імпульсів продемонстрував, що в цій області існує чимало важливих нерозв'язаних задач та невирішених проблем. Головним чинником, що заважає просунутись у цьому напрямку є те, що для розрахунку використовуються наближені методи аналізу хвильових процесів у таких структурах та необґрунтоване перенесення інтуїтивних уявлень щодо руху хвиль з частотної області у часову. Тому актуальною є розробка строгих методів (як аналітичних, так і числових) моделювання й аналізу процесів стиснення електромагнітного імпульсу.

Актуальність теми підтверджується також тим, що дисертаційна робота підсумовує результати виконання п'яти держбюджетних НДР, що виконувались в Інституті радіофізики та електроніки (ІРЕ) НАН України. Автор був виконавцем та відповідальним виконавцем зазначених проектів.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох головних розділів та висновків. Щодо кожної з поміж розглянутих задач чітко сформульовано проблему, запропонований метод розв'язання, його реалізація, отримані результати, обґрунтовані висновки та перспективні напрямки подальших досліджень.

У другому розділі дисертації у строгій формі сформульовано постановку початково-крайових задач у відкритих двовимірних областях у декартовій та циліндричній системах координат. Побудовано та апробовано коректну в обчислювальному відношенні, локальну щодо просторової та часової змінних точну поглинаючу умову, що дозволила коректно обмежити розрахунковий простір у двовимірних плоских задачах з прямокутною віртуальною межею. Запропоновано оригінальний алгоритм обчислення каузальних згорток, що входять до нелокальних поглинаючих умов. Цей алгоритм дозволив зберігати на жорсткому диску більшу частину інформації щодо «історії» імпульсних хвиль на віртуальній межі обчислювальної області, що суттєво знизило (на два порядки) вимоги до обсягу потрібної оперативної пам'яті.

В наступних двох розділах детально вивчається фізика перехідних процесів, що відбуваються при пасивній та активній компресії ЕМІ. Вивчено умови виникнення та проаналізовано конкретні фізичні ефекти, що супроводжують процеси пасивної та активної компресії. Надано оцінку можливості їх використання для досягнення більш високих показників потужності ЕМІ при розробці відповідних компресорів.

Наукова новизна одержаних результатів. За кількістю та якістю нових наукових результатів робота В. Л. Пазиніна цілком задовольняє рівню вимог до докторських дисертацій. Результати достатньо чітко та конкретно сформульовано й у тексті роботи, і в авторефераті. Я зазначу лише ті, що здались найбільш цікавими особисто мені.

Автором вперше в основу строгого розв'язання задач пасивної компресії у хвилеводних трактах з дисперсією покладено адаптований ним метод обертання хвильового фронту. Цей метод узагальнено також на випадок дисперсійних елементів, яким властиві втрати різної природи: дифракційні, омичні, радіаційні (опір випромінювання). На цій основі строго визначено

вимоги щодо амплітудної та частотної модуляції мікрохвильових імпульсів, що стискаються в ділянках порожнього металічного й відкритого діелектричного хвилеводів, а також імпульсів оптичного й інфрачервоного діапазонів, що стискаються у середовищах з дисперсією діелектричної проникності. Продемонстровано, що запропонований метод компенсації втрат за рахунок підсилення квадратичним множителем спектру імпульсу перед обертанням хвильового фронту є дієвим для досить широкої частотної смуги імпульсу.

Наведено обґрунтовану критику застосування до дисперсійного стиснення імпульсів так званого «кінематичного наближення», що базується на представленні широкосмугового імпульсу у вигляді суперпозиції хвильових пакетів, кожний з яких рухається зі своєю фазовою швидкістю.

Для моделювання й аналізу процесів активної компресії ЕМІ розвинуто та узагальнено метод точних поглинаючих умов, що дозволяє приводити відкриті початково-граничні задачі обчислювальної електродинаміки до еквівалентних закритих задач, що можуть бути ефективно розв'язані на основі ефективної й універсальної схеми методу скінченних різниць у часовій області (FDTD). Наявні методи, що використовуються для вирішення цієї проблеми (ідеально узгоджений шар), мають певні недоліки при застосуванні до резонансних структур, в яких потрібне довготривале моделювання, адже навіть малий рівень відбиття від поглинаючих умов може суттєво змінювати картину резонансу та поведінку структури при нестационарних параметрах середовища. Застосування дисертантом більш строгих та точних методів дозволило вперше проаналізувати в рамках строгих електродинамічних моделей усі перехідні процеси в активних компресорах мікрохвильових імпульсів. Пазинін В. Л. запропонував та реалізував схеми модельного синтезу пристроїв з оптимальними характеристиками, що було недосяжним в межах попередніх підходів.

Наукова значимість роботи полягає в розвитку строгих методів числового моделювання нестационарних електромагнітних процесів – методу обертання хвильового фронту та метода точних поглинаючих умов. Такий підхід гарантує, зокрема, **достовірність усіх отриманих у дисертації результатів**. Крім того, обґрунтованість та достовірність результатів підтверджується й низкою виконаних тестів, в яких порівнювались характеристики, що розраховані побудованими в дисертації алгоритмами й алгоритмами, що базуються або на відомих аналітичних представленнях, або ж на інших строгих методах (метод часткових областей). Зокрема, було розглянуто задачі випромінювання у вільний простір нескінченної нитки зі

струмом, електричного диполя, відкритого кінця хвилеводу, задачу дифракції хвилі на ступінчастому розширенні хвилеводу та інші.

Практична значимість результатів моделювання процесів **пасивного стиснення ЕМІ** полягає у тім, що як сама методика, так і відповідні числові алгоритми можуть бути без суттєвих змін використані при розв'язанні актуальних теоретичних та прикладних задач компресії у майже довільних хвилепровідних трактах та середовищах з дисперсією. **Практична значимість** результатів моделювання процесів **активного стиснення ЕМІ** продемонстрована в результатах четвертого розділу дисертаційної роботи, де синтезовано прототипи реальних накопичувальних систем одноступеневого та двоступеневого компресорів, що складаються з як власно резонаторів-накопичувачів з вікнами зв'язку, так і з інтерференційних перемикачів режимів «накопичення – скидання». Також вперше було модельовано й детально досліджено перехідні процеси, що відбуваються при перемиканні активного елемента в замикаючому H -площинному розширенні хвилеводу й показано, що існують два механізми переходу такого ключа із запертого стану у відкритий.

Синтезовано прототип двоступеневого компресора з відкритим дводзеркальним резонатором у першому ступені й одним інтерференційним перемикачем у резонаторі другого ступеня, в якому реалізовано ключовий ефект повного перекачування енергії.

В цілому, в дисертаційній роботі В. Л. Пазиніна не лише знайдено вирішення низки конкретних теоретичних та практичних проблем, що пов'язані з компресією ЕМІ, а й запропоновано ефективні підходи, доповнені відповідними інструментами, які суттєво спрощують та пришвидшують процес удосконалення наявних типів компресорів та розробку принципово нових пристроїв.

Повнота викладу положень та висновків дисертації в опублікованих працях. Основні результати дисертації у повній мірі опубліковано у 23 статтях у наукових фахових журналах (у тому числі 12 закордонних і одному розділі у книзі зарубіжного видавництва) та в 11 тезах доповідей на міжнародних конференціях. Автореферат повністю відображає зміст та основні положення дисертації. Автор чітко розмежував власний здобуток та внесок співавторів у публікаціях.

Зауваження по дисертаційній роботі. Незважаючи на в цілому високий рівень дисертації, вона не позбавлена деяких недоліків.

- У розділі 3.9 розглянуто стискання одновимірної хвилі, що поширюється у середовищі з дисперсією діелектричної проникності. Однак для застосувань важливим є подібний аналіз для випадку локального джерела (2- та 3-вимірні задачі). Но для цього потрібно узагальнення запропонованого автором у розділі 2 методу на випадок розв'язання рівнянь Максвелла з інтегральною часовою згорткою в матеріальному рівнянні (2.2).
- Рівняння (2.194) названо в дисертації рівнянням Клейна-Гордона-Фока, хоча зазвичай у такій формі його називають просто рівнянням Клейна-Гордона, а термін «рівняння Клейна-Гордона-Фока» вживають до аналогічного рівняння зі змінним коефіцієнтом, яке виникає при розділенні змінних у сферичних координатах.
- Хоча запропоновані у розділі 2 точні поглинаючі умови є строгими, але вони є нелокальними у часі, що призводить до необхідності розраховувати згортки (2.81), що, незважаючи на застосування просунутого блочного методу з асимптотою $O(k \log^2 k)$, є обтяжливим у обчислювальному плані. Тому більш прості альтернативні методи, такі як Convolutional PML, що використовують локальну у часі рекурсивну згортку, можуть забезпечувати краще співвідношення обчислювальних затрат (які у випадку CPML вимірюються додатковим простором) до потрібного рівня відбиття. На жаль в дисертації бракує ґрунтового порівняння з цим методом у термінах ефективності.
- Кількість задач, що розглянуті у розділі 4, значно перевищує можливості їх відображення в авторефераті, тому, хоч задачі, що стосуються положень, що виносяться на захист, повністю описано в авторефераті, але за лаштунками залишились кілька цікавих структур.
- По тексту подекуди зустрічаються огріхи у використанні українськомовних термінів, наприклад «ступінь» деінде вживається у жіночому роді.

Зазначені недоліки не впливають на загальну високу оцінку дисертаційної роботи.

Висновок. Дисертація є закінченим науковим дослідженням, в якому вирішено низку актуальних проблем, що пов'язані з коректним моделюванням хвильових процесів у компресорах електромагнітних імпульсів. Отримані результати є достатньо обґрунтованими та можуть скласти базис для подальшого прогресу імпульсних джерел на основі компресії електромагнітних імпульсів. Робота є зрозуміло структурованою та написаною з дотриманням наукового стилю, висновки сформульовано конкретно та обґрунтовано. Автореферат повною мірою відображає зміст дисертації. Вважаю, що рецензована робота задовольняє усім чинним вимогам до докторських дисертацій, а її автор, Пазинін Вадим Леонідович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент

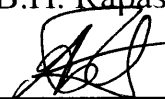
доктор фізико-математичних наук, доцент,

провідний науковий співробітник

кафедри теоретичної радіофізики

Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

20.11.2019



О. Ю. Бутрим

