

Національна академія наук України  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова

**ПАЗИНІН ВАДИМ ЛЕОНІДОВИЧ**

УДК 537.86: 517.958

**МОДЕЛЮВАННЯ І АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ПАСИВНОЇ ТА АКТИВНОЇ  
КОМПРЕСІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ІМПУЛЬСІВ МІКРОХВИЛЬОВОГО  
І ОПТИЧНОГО ДІАПАЗОНІВ**

01.04.03 – радіофізика

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

Харків – 2019

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова  
Національної академії наук України, м. Харків

**Науковий консультант** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Сіренко Юрій Костянтинівич**,  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова  
НАН України (м. Харків),  
головний науковий співробітник лабораторії  
математичної фізики, відділу статистичної  
радіофізики

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Просвірін Сергій Леонідович**,  
Радіоастрономічний інститут НАН України  
(м. Харків), завідувач відділу теоретичної радіофізики

доктор технічних наук, професор  
**Сухаревський Олег Ілліч**,  
Харківський національний університет Повітряних  
Сил імені Івана Кожедуба МО України (м. Харків),  
провідний науковий співробітник  
наукового центру Повітряних Сил

доктор фізико-математичних наук, доцент  
**Бутрим Олександр Юрійович**,  
Харківський національний університет  
імені В.Н. Каразіна МОН України (м. Харків),  
провідний науковий співробітник кафедри  
теоретичної радіофізики

**Захист відбудеться** 19 грудня 2019 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова  
НАН України (61085, м. Харків, вул. Академіка Проскури, 12).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту радіофізики та  
електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України (61085, м. Харків, вул. Академіка  
Проскури, 12).

Автореферат розісланий 14 листопада 2019 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

І.В. Іванченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Потужні електромагнітні імпульси (ЕМІ) широко використовуються у таких галузях науки та техніки як радіолокація, передача цифрової інформації, нагрів плазми, прискорювальна техніка. Вкрай важливим є отримання імпульсів з якомога великою напруженістю поля та з якомога малою тривалістю. Одним з поширених способів досягнення екстремальних значень цих параметрів є компресія ЕМІ, що генеруються наявними джерелами. У дисертації розглядається два типи такої компресії: пасивна та активна. Фізика першої з них ґрунтується на деформації імпульсу, що поширюється у хвилевідному тракту або середовищі з дисперсією групової швидкості. За певної комбінації просторово-часових і просторово-частотних параметрів початкового імпульсу та дисперсійного тракту можливо суттєве стискання цього імпульсу і посилення його потужності [1\*, 2\*]. Принцип активної компресії полягає в накопиченні енергії зовнішнього квазімонохроматичного джерела в деякому резонаторі та подальшому її швидкому (за час, що набагато менший часу накопичення) скиданню у відвідний хвилевід або вільний простір [3\*, 4\*].

Прогрес в електродинамічних характеристиках пристроїв, що реалізують компресію ЕМІ (компресорів), цілком залежить від того, наскільки досконало вивчена фізика перехідних процесів в них та наскільки точно узгоджені геометричні й електричні параметри цих пристроїв з відповідними параметрами хвилі, що стискається. Таке акуратне узгодження можливе лише за наявності точних математичних моделей, які описують поширення/дифракцію хвиль у подібних пристроях. Основні вимоги, що висувуються до таких моделей, окрім їх точності, можна сформулювати наступними тезами. По-перше, вони мають описувати перехідні, часто дуже тривалі, процеси у відкритих резонансних та/або дисперсійних хвилевідних елементах. По-друге, надавати можливість розрахунку електродинамічних параметрів хвилевідних вузлів, що містять параметричні елементи, тобто елементи, електричні властивості яких змінюються у часі. (Останнє вкрай важливо при аналізі роботи активних компресорів.) Наразі моделей, що задовольняли б обом цим вимогам, у дослідників (за винятком харківської радіофізичної школи) немає.

У дисертації для цих цілей побудовано строгу електродинамічну модель, в основу якої покладено коректну постановку початково-крайових задач у відкритих (тобто тих, що містять нескінченно віддалену точку) областях аналізу та подальший розв'язок таких задач скінченно-різницеvim методом у часовій області або FDTD (Finite Difference Time Domain method) [5\*]. Цей метод відносно простий у комп'ютерній реалізації, універсальний (тобто придатний для моделювання вкрай широкого кола геометрій структур та форм імпульсів, що досліджуються), але в «класичному» вигляді, в якому його описано у літературі, погано пристосований для моделювання довготривалих хвильових процесів у відкритих областях аналізу. Це, насамперед, пов'язано з використанням на віртуальних межах областей аналізу «ідеально узгоджених шарів» або PML (Perfectly Matched Layers). По-перше, ці шари частково відбивають хвилі, що падають на них. Останні, навіть малого рівня, повертаються, наприклад, до резонатора, який моделюється, та підсилюються ним, що призводить до

спотворення характеристик, що отримуються. По-друге, такі шари не дозволяють акуратно вбудовувати в різницевої схеми первинні власні імпульсні хвилі напівнескінчених хвилеводів з ненульовою критичною частотою, які можна було б використовувати для збудження об'єктів, що досліджуються. Техніка такого вбудовування, яка описана в літературі, призводить до радикального спотворення форми первинної хвилі насамперед у випадку, коли її спектр розташований поблизу критичної частоти. Тому в дисертації зроблено вибір на користь точних поглинаючих умов (ТПУ) [6\*], які накладаються на компоненти поля на віртуальних межах, і які коректно описують як хвилі, що приходять з нескінченності, так і хвилі, що йдуть до неї, незалежно від розташування їх спектру відносно частоти відсічки (метод ТПУ). Також ТПУ було використано і для віртуальних меж, що розташовані у вільному просторі. У сукупності це дозволило побудувати ефективні алгоритми розрахунку просторово-часових деформацій електромагнітних хвиль у об'єктах з відносно довільною геометрією, зокрема таких, що є складовими частинами активних або пасивних компресорів.

Такий підхід до моделювання перехідних процесів дозволяє уперше перейти від наближених і часто математично необґрунтованих методів аналізу, які зазвичай використовуються при конструюванні компресорів імпульсів, до повноцінних чисельних експериментів, які надають всі кількісні характеристики об'єктів, що моделюються, та виконувати їх оптимізацію ще до побудови лабораторних прототипів.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана в лабораторії математичної фізики відділу статистичної радіофізики Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України (ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України) і відповідає одному з напрямків наукових досліджень (електроніка і радіофізика міліметрових і субміліметрових хвиль), затверджених постановою Президії НАН України №30 від 11.02.2009 р. Дослідження за темою дисертації здійснювалися відповідно до плану наступних держбюджетних науково-дослідницьких робіт ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України: *«Теоретичне та експериментальне дослідження хвильових процесів в системах мікрохвильового діапазону»* (шифр «БУКСИР 2», номер держреєстрації 0103U002267), *«Розробка та впровадження нових методів обчислювальної радіофізики, теоретичне та експериментальне дослідження трансформації електромагнітних полів гіга- і терагерцевого діапазонів в об'єктах і середовищах антропогенного та природного походження»* (шифр «БУКСИР 3», номер держреєстрації 0106U011975), *«Розробка та впровадження нових методів обчислювальної радіофізики; теоретичне та експериментальне дослідження трансформації електромагнітних полів гіга-, терагерцевого та оптичного діапазонів в об'єктах і середовищах антропогенного та природного походження; аналіз та синтез нових вузлів і пристроїв резонансної квазіоптики, твердотільної електроніки, імпульсної та антенної техніки; розробка і тестування нових вимірювальних схем рефлекто- і діелектрометрії»* (шифр «БУКСИР 4», номер держреєстрації 0112U000210), *«Теоретичне та експериментальне дослідження взаємодії електромагнітних хвиль гіга-, терагерцевого та оптичного діапазонів у природних та штучних структурах з метою розробки перспективних функціональних пристроїв антенної техніки,*

*квасіоптики, мікрохвильової електроніки та нових радіофізичних технологій у біології та медицині» (шифр «БУКСИР 5», номер держреєстрації 0117U004033), «Розробка нових методів і засобів отримання інформації про фізичні характеристики природних середовищ, їх структурних неоднорідностей, поверхонь розподілу та окремих об'єктів за даними дистанційного зондування і радіолокації» (шифр «СЕНСОРИКА 2», номер держреєстрації 0118U003035), а також в рамках цільової програми НАНУ «Розробка нових методів і програмного комплексу ГРІД обчислень для задач радіофізики, біофізики і фізики твердого тіла» (номер держреєстрації 0111U003983).*

**Мета і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи – побудова строгих та ефективних підходів до вирішення проблем, що виникають при аналізі та синтезі пасивних та активних компресорів ЕМІ, та вивчення за їх допомогою фізики процесів, що реалізуються у таких пристроях.

Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні ключові задачі:

- розвинуто метод ТПУ, орієнтований на ефективне і строге рішення задач компресії ЕМІ;
- створено програмні комплекси, що реалізують розв'язання відкритих двовимірних початково-крайових задач у декартовій та циліндричній системах координат з довільною геометрією та матеріальними параметрами;
- розвинуто метод обернення хвильового фронту (ОХФ) для моделювання процесів пасивного стискання ЕМІ;
- проведено обчислювальні експерименти, орієнтовані на: (а) вивчення фізики перехідних процесів, що реалізуються при пасивній та активній компресії ЕМІ; (б) виявлення та аналіз різного роду ефектів, що представляють інтерес для використання в перспективних конструкціях компресорів ЕМІ; (в) визначення оптимальної послідовності кроків, що реалізують схеми модельного синтезу пасивних і активних компресорів;
- розроблено загальну схему модельного синтезу пасивних і активних компресорів ЕМІ.

*Об'єкт дослідження* – процеси поширення і розсіяння електромагнітних хвиль у дисперсійних напрямних структурах та в резонансних структурах, електричні параметри яких можуть змінюватися у часі.

*Предмет дослідження* – просторово-часові і просторово-частотні трансформації електромагнітних хвиль у процесі їх дисперсійного або резонансного стиснення.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених у дисертації задач використовувалися строгі аналітичні та чисельні методи – метод обернення хвильового фронту, метод неповного розділення змінних, метод інтегральних перетворень, метод точних поглинаючих умов, метод скінченних різниць у часовій області, а також математичне моделювання й обчислювальний експеримент.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному.

1. Розвинуто метод ТПУ, який в сукупності зі скінченно-різницеvim методом дозволив ефективно будувати строгі розв'язки відкритих початково-крайових

задач електродинаміки з довільною геометрією джерел та розсіювачів поля. В рамках цього напрямку досліджень:

- а. Отримано нову ТПУ для прямокутної віртуальної межі у вільному просторі. Ця умова є локальною як за просторовими, так і за часовою змінними.
  - б. Визначено оптимальну в обчислювальному плані ТПУ для поперечних перерізів регулярних металевих хвилеводів. Ця умова є каузальною згортокою «історії» імпульсної хвилі на віртуальній межі з функцією Бесселя, поділеною на свій аргумент (нелокальна за часовою змінною), та потребує менших проміжних обчислень при комп'ютерній реалізації, ніж аналогічні відомі поглинаючі умови.
  - в. Запропоновано новий алгоритм обчислення каузальних згорток, з яких складаються нелокальні ТПУ, який дозволяє зберігати більшу частину «історії» імпульсних хвиль на жорсткому диску комп'ютера. Це радикально (у сотні разів) знизило вимоги до ємності оперативної пам'яті комп'ютерів, що використовуються для розв'язання початково-крайових задач, та привело до значного зменшення загального часу такого розв'язання.
  - г. Запропоновано новий алгоритм вбудовування у різниціві схеми імпульсних хвиль, що приходять з напівнескінченних хвилеводів, зі спектром, що розташований як завгодно близько до критичної частоти робочої моди.
2. Уперше метод ОХФ було адаптовано для строгого моделювання пасивного стиснення ЕМІ у хвилевідних трактах з дисперсією групової швидкості. У рамках цього напрямку досліджень:
- а. Метод ОХФ узагальнено на випадок дисперсійних елементів з втратами різної природи: дифракційними, радіаційними, омичними, а також опором випромінювання.
  - б. Отримано узагальнення методу ОХФ, яке дозволяє визначати часовий профіль ЕМІ на вході випромінювача з довільною геометрією за заданим профілем цього імпульсу в довільній точці простору.
  - в. На прикладі порожнистих металевих хвилеводів показано непридатність відомого кінематичного наближення для визначення законів модуляції імпульсу, що стискається. Встановлено придатність таких хвилеводів для стиснення імпульсів з шириною спектральної смуги до 2-х октав.
  - г. Уперше методом ОХФ промодельовано пасивне стиснення ЕМІ у хвилевідній секції, що містить відрізок жолобкового хвилеводу. Показано, що у міліметровому діапазоні такі секції, внаслідок менших втрат, більш привабливі для компресії імпульсів, ніж прямокутні хвилеводи такої самої довжини.
  - д. Уперше методом ОХФ промодельовано стиснення оптичних та інфрачервоних імпульсів у кристалах GaAs, ZnTe, LiF, RbI, CsCl з

дисперсією діелектричної проникності. Доведено можливість стиснення ЕМІ у таких кристалах з шириною частотної смуги від однієї до чотирьох октав зі збільшенням їх пікової потужності від 27 дБ до 60 дБ на одному метрі оптичної траси.

3. Розроблено покрокову схему модельного синтезу активних компресорів ЕМІ, в основу якої покладено розв'язання початково-крайових задач, що описують трансформації ЕМІ у відповідних електродинамічних вузлах. У рамках цього напрямку досліджень:
  - а. Синтезовано прототип активного компресора з накопиченням енергії у  $TM_{01n}$ -коливанні аксіально-симетричного резонатора з інтерференційним перемикачем у вигляді запірної щілини у внутрішньому провіднику відвідної коаксіальної лінії. Показано, що тривалість вихідного імпульсу такого компресора близька до теоретичної межі, що дорівнює подвоєному часу пробігу хвилі вздовж резонатора.
  - б. Синтезовано прототип накопичувального резонатора на відрізку прямокутного хвилеводу із запірним розширенням у  $H$ -площині та щілиною зв'язку у торцевій стінці. Показано, що такий резонатор може збуджуватися як у режимі резонансного проходження, так і в режимі резонансного відбиття хвилі накачки. В останньому випадку добротність робочого  $TE_{01n}$ -коливання досягає максимуму.
  - в. Уперше строго промодельовані перехідні процеси, які відбуваються під час перемикання активного елемента (об'єму резонатора, в який вводиться зовнішній електронний потік) у запірному  $H$ -площинному розширенні прямокутного хвилеводу. Показано, що існують два механізми перемикання такого розширення у відкритий стан: дисипація енергії стоячої хвилі та зміщення його резонансної частоти.
  - г. Синтезовано нову модель двоступеневого компресора з відкритим дводзеркальним резонатором у першому ступені та одним інтерференційним перемикачем у другому хвилевідному ступені. У цій моделі отримано більш ніж дворазове підвищення імпульсної потужності в порівнянні з компресором, в якому використовується тільки один хвилевідний ступінь.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в розроблених методах моделювання процесів стиснення ЕМІ та побудованих на їх основі високоефективних алгоритмах, які дозволяють обчислювати основні характеристики активних та пасивних компресорів. Важливо, що ці методи розрахунків є строгими, що гарантує потрібний рівень похибки у результатах, що отримуються. Методологія використання розроблених алгоритмів, яка запропонована у дисертації, дозволяє виконувати синтез та оптимізацію компресорів ще до їх виготовлення, зменшуючи у такий спосіб витрати на створення цих пристроїв.

Синтезовані у роботі прототипи активних компресорів ЕМІ на відрізьку прямокутного хвилеводу із запірним розширенням у бічній стінці прямо вказують на проблему, що виникає в процесі практичної реалізації таких накопичувальних резонаторів. Це проблема їх точного налаштування на режим максимальної добротності робочого колювання. Таке налаштування, судячи з аналізу літератури, ніколи не здійснювалося, що призводить до втрати потужності вихідних імпульсів компресорів, які розробляються. У дисертаційній роботі уперше виконано таке налаштування і показано, що воно супроводжується певними труднощами, пов'язаними з відсутністю характерних резонансних кривих у частотних залежностях коефіцієнтів трансформації хвиль на такому резонаторі (у режимі максимальної добротності). Запропоновано рішення цієї проблеми, яке полягає у перенесенні щілини зв'язку з хвилеводом живлення з торцевої на бічну стінку резонатора.

Слід також зазначити практичну цінність отриманого узагальнення методу ОХФ для проектування пасивних компресорів: завдяки йому стала можливою побудова компресорів ЕМІ з довільною шириною частотної смуги (кілька октав) робочого імпульсу та довільними втратами в їх дисперсійних елементах.

**Особистий внесок здобувача.** У дисертації узагальнено результати досліджень, що опубліковані в наукових статтях [1–23], розділі монографії [24] і тезах конференцій [25–35]. Особистий внесок здобувача в роботах [1–8, 11–14, 17–20, 22–32, 35] полягав у дискретизації початково-крайових задач і перенесенні їх в комп'ютерний код, в тестуванні розробленого програмного продукту і обробці результатів обчислювальних експериментів. У цих та інших роботах, написаних у співавторстві, здобувач брав участь в аналізі фізичних результатів і формулюванні узагальнюючих висновків. У роботі [14], що містить огляд проблематики поглинаючих граничних умов, здобувачем виконані всі чисельні експерименти, а також запропонована і реалізована унікальна модифікація алгоритму швидкого обчислення каузальних згорток, що дозволяє переносити частину «історії» сигналу на віртуальній межі з оперативної пам'яті на жорсткий диск комп'ютера. У роботі [22] в рамках проведеного тестування ТПУ здобувачем реалізовані в різницевій схемі (крім власне умов, що тестувалися) наближені умови першого та другого порядку апроксимації і умови «ідеально узгодженого шару» (PML). У роботах [1–8, 24, 27–31] здобувач виконав низку чисельних експериментів, в яких моделювалися частотні характеристики окремих хвилевідних вузлів, вузлів накопичувальних резонаторів активних компресорів і дифракційного випромінювача [3]. Фрагмент глави монографії [24], що присвячений пасивній компресії ЕМІ у відрізьку регулярного хвилеводу, містить чисельні результати, які були повністю отримані дисертантом. Внесок здобувача в роботи [15, 16, 21, 33, 34] полягав у виборі дисперсійних елементів, для яких моделювалося пасивне стиснення ЕМІ, і в науковому керівництві проведеними дослідженнями. Роботи [9, 10, 12, 13, 17, 20, 23] виконані без співавторів. Здобувачем були побудовані і реалізовані в комп'ютерному коді аналітичні подання для локальних ТПУ на прямокутній віртуальній межі в тому вигляді, в якому вони використовувалися при проведенні досліджень, результати яких публікувалися в роботах зі співавторами. Ці ТПУ описані в підрозділі 2.5 дисертації. Результати, що представлені в підрозділі 3.9, присвяченому



моделюванню компресії оптичних та інфрачервоних імпульсів, а також у підрозділі 4.5, присвяченому моделюванню роботи двоступеневого активного компресора, (доповідалися на конференціях [32, 34, 35]) отримані автором дисертації особисто.

Матеріали публікацій [1, 2, 4, 25–27] були використані співавторами дисертанта в таких кваліфікаційних роботах:

- Сіренко К.Ю. Перетворення та випромінювання електромагнітних імпульсів структурами з осьовою симетрією. – дис. ... канд. фіз.-мат. наук. – 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, Харків, 2007.
- Амосова А.І. Моделювання перехідних процесів у двовимірних відкритих електродинамічних структурах. – дис. ... канд. фіз.-мат. наук. – 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, Харків, 2009.
- Хруслов М.М. Дифракційні ефекти та їх вплив на властивості аксіально-симетричних монопольних випромінювачів НВЧ діапазону. – дис. ... канд. фіз.-мат. наук. – 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, Харків, 2012.
- Shafalyuk O. Electrodynamics simulation of open axially-symmetrical compact resonators: 2-D initial boundary value and boundary value problems. – Doctor of philosophy thesis. – Masquarie university, Sydney, 2012.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали, які представлені в дисертаційній роботі, доповідалися й обговорювалися на науковому семінарі «Теорія дифракції та дифракційна електроніка» ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, а також на таких міжнародних конференціях:

- 4-th International Conference on Antenna Theory and Techniques (Sevastopol, Ukraine, 2003);
- 2-nd International Workshop “Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals” (Sevastopol, Ukraine, 2004);
- 6-th International Conference on Antenna Theory and Techniques (Sevastopol, Ukraine, 2007);
- 38-th European Microwave Conference (Amsterdam, the Netherlands, 2008);
- URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (Berlin, Germany, 2010);
- 5-th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (Sevastopol, Ukraine, 2010);
- USNC-URSI National Radio Science Meeting (Spokane, USA, 2011);
- 7-th International Conference “Acoustooptic and radar methods for information measurements and processing”, (Moscow-Suzdal, Russia, 2014);
- 22-nd International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (Lviv-Dnipro, Ukraine, 2017);
- IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (Lviv, Ukraine, 2017);
- The Progress in Electromagnetics Research Symposium (Toyama, Japan, 2018).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в **35** наукових роботах [1–35]: у **23** статтях у профільних наукових журналах [1–23], в **1** розділі монографії [24] і в **11** тезах доповідей на міжнародних конференціях [25–35].

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів основного тексту з рисунками і таблицями, висновків, списку використаних літературних джерел і одного додатка. Обсяг дисертації становить 379 сторінок. Вона містить 122 рисунки (з них 40 розміщені на 33 окремих сторінках), 5 таблиць (1 з них на окремій сторінці) та 369 бібліографічних посилань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета, основні задачі, об'єкт та предмет дослідження, наведені нові наукові результати, що виносяться до захисту, та їх практичне значення. Також наведено дані щодо публікацій здобувача, його особистого внеску в них та апробації отриманих результатів. Надано інформацію про структуру та обсяг дисертації.

У **розділі 1** дано визначення поняттям активного і пасивного стискання ЕМІ, виконано огляд літератури, пов'язаної з такою компресією, проаналізовано сучасний стан розвитку цієї проблематики. Цей огляд дав підставу констатувати, що існує багате різноманіття конструктивних рішень щодо практичної реалізації майже всіх базових вузлів, з яких складаються як активні, так і пасивні компресори імпульсів, а також фізичних принципів, на яких засновано їх функціонування. Але, разом з тим, існує і великий розрив між характеристиками компресорів (наприклад, коефіцієнти стискання або посилення), що отримуються на практиці, та їх граничними значеннями, що отримані теоретично. Зазвичай цей розрив складає приблизно  $30 \div 40$  дБ для коефіцієнту підсилення потужності. Зроблено висновок, що це протиріччя між теорією та результатами, що отримані на практиці, є наслідком некоректного підходу, який зазвичай використовується при моделюванні нестационарних хвильових процесів у компресорах ЕМІ. Цей підхід ґрунтується на наближеннях, що отримані відомими методами у частотній області, але ніяк не обґрунтовані для часової області. Розв'язання цього протиріччя можливо лише через створення коректних і точних математичних моделей поширення/дифракції нестационарних хвиль у досить складних електродинамічних об'єктах з дисперсією та/або вузлах, що містять параметричні елементи, тобто елементи, електричні параметри яких можуть змінюватися у часі (останнє важливо при вивченні активних компресорів).

У дисертаційній роботі для побудови таких моделей надано перевагу скінченно-різницевому методу у часовій області (або FDTD) [5\*], оскільки він, по-перше, ідеально пристосований для моделювання імпульсних хвиль, по-друге, органічно, без будь-яких істотних змін розрахункових формул, допускає моделювання параметричних об'єктів. Тому, у першому розділі також виконано огляд літератури, присвяченої методу FDTD, а також фундаментальній проблемі, що виникає при використанні цього методу при аналізі хвильових процесів у

відкритих областях аналізу. Це проблема коректного обмеження розрахункового простору. Існує дві техніки такого обмеження. Перша й найпоширеніша техніка – це використання так званого ідеально узгодженого шару (або PML). Це такий шар, що не відповідає жодному фізичному об'єктові на віртуальній межі розрахункового простору, але завдяки певним математичним прийомам дозволяє знизити рівень відбиття хвилі, що падає на такий шар, до  $-60\text{дБ}$  і нижче. Інша техніка полягає в використанні точних поглинаючих умов для компонент поля на віртуальній межі (метод ТПУ). Вона зазвичай потребує більших обчислювальних ресурсів ніж PML, але гарантує рівень відбитої від віртуальної межі хвилі, що менший за рівень похибок скінченно-різницевого методу. В подальшому, при побудові строгих математичних моделей, надано перевагу методу ТПУ.

У розділі 2 виконано строгую постановку початково-крайових задач, які складають основу усіх розроблених у дисертації моделей та проведених за їх допомогою чисельних експериментів. Всього таких початково-крайових задач чотири: вони сформульовані для  $E$ - та  $H$ - поляризованих хвиль у двовимірних областях аналізу в декартовій  $\{x, y, z\}$  (за відсутності залежності від координати  $x$ ) та циліндричній  $\{\rho, \phi, z\}$  (за відсутності залежності від координати  $\phi$ ) системах координат. Приклад такої початково-крайової задачі для  $E$ - поляризованих хвиль у декартовій системі координат наведено у наступній формулі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\eta_0} \cdot \frac{\partial(\varepsilon E_x)}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x - J_{src,x}, \\ \eta_0 \frac{\partial(\mu H_y)}{\partial t} = -\frac{\partial E_x}{\partial z} - \delta H_y - M_{src,y}, \quad \eta_0 \frac{\partial(\mu H_z)}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \delta H_z - M_{src,z}, \\ \{y, z\} \in \mathbf{Q}_L, \quad t \geq 0, \\ E_x|_{t=0} = 0, \quad H_y|_{t=0} = 0, \quad H_z|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial E_x}{\partial t}|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial H_y}{\partial t}|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial H_z}{\partial t}|_{t=0} = 0, \\ E_x^{(i)}(y, z, t)|_{y,z \in \mathbf{B}} = E_x^{(j)}(y, z, t)|_{y,z \in \mathbf{B}}, \quad H_\tau^{(i)}(y, z, t)|_{y,z \in \mathbf{B}} = H_\tau^{(j)}(y, z, t)|_{y,z \in \mathbf{B}}, \\ E_x(y, z, t)|_{y,z \in \mathbf{M}} = 0, \\ \int_{V_c} (\varepsilon E_x^2 + \mu(H_y^2 + H_z^2)) dV < \infty, \\ \mathbf{A}_L [E_x^{out}(y, z, t)]_{y,z \in \mathbf{L}} = 0, \\ \mathbf{A}_{L_p} [u_n^{out,p}(z', t)]_{y',z' \in \mathbf{L}_p} = 0, \quad E_x^{out,p}(y', z', t) = \sum_n u_n^{out,p}(z', t) \mu_n^p(y'), \\ \mathbf{A}_{L_q} [u_m^{inc,q}(z', t)]_{y',z' \in \mathbf{L}_q} = 0, \quad E_x^{inc,q}(y', z', t) = u_m^{inc,q}(z', t) \mu_m^q(y'). \end{array} \right. \quad (1)$$

Тут  $E_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$  – декартові компоненти векторів напруженості електричного і магнітного полів,  $J_{src,x}$ ,  $M_{src,y}$ ,  $M_{src,z}$  – компоненти векторів щільності сторонніх

електричного і магнітного струмів,  $\varepsilon$ ,  $\mu$  – відносна діелектрична і магнітна проникності,  $\sigma$  – питома електрична провідність середовища,  $\delta$  – множник, що описує магнітні втрати у середовищі [5\*], змінна  $t$  є добутком істинного часу  $\tilde{t}$  на швидкість світла у вакуумі ( $t = c\tilde{t}$ ,  $c = 299792458$  м/с) і вимірюється у метрах (одиниці вимірювання інших фізичних величин визначаються системою СИ). Інтеграл по об'єму  $V_C$  задає умову на ребрі діелектричного або металевого об'єкту, яка міститься у  $V_C$  [7\*].

Оператор  $\mathbf{A}_L[E_x(y, z, t)]_{y, z \in L}$  – це локальна ТПУ, що накладається на компоненту електричного поля  $E_x^{out}(y, z, t)$  на прямокутній віртуальній межі  $L$  у вільному просторі. Для визначення цього оператора на кожній з чотирьох прямолінійних ділянок межі  $L$  вводяться допоміжні функції  $V_m(y_i, z, t, \varphi)$  ( $m = 1, 2, 3, 4$ ), для яких

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x(y, z_i, t) = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{\partial V_m}{\partial t}(y, z_i, t, \varphi) d\varphi \\ \frac{\partial^2 V_m}{\partial t^2} - \sin^2 \varphi \frac{\partial^2 V_m}{\partial y^2} = \pm \frac{\partial U}{\partial z} \left\{ \begin{array}{l} z_i = Z \\ z_i = 0 \end{array} \right\}, \\ V_m|_{t=0} = \frac{\partial V_m}{\partial t}|_{t=0} = 0 \end{array} \right., \quad \left\{ \begin{array}{l} E_x(y_i, z, t) = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{\partial V_m}{\partial t}(y_i, z, t, \varphi) d\varphi \\ \frac{\partial^2 V_m}{\partial t^2} - \sin^2 \varphi \frac{\partial^2 V_m}{\partial z^2} = \pm \frac{\partial U}{\partial y} \left\{ \begin{array}{l} y_i = Y \\ y_i = 0 \end{array} \right\}, \text{ і т.д. (2)} \\ V_m|_{t=0} = \frac{\partial V_m}{\partial t}|_{t=0} = 0 \end{array} \right.$$

У кутових точках  $L$  допоміжні функції  $V_m$  зв'язані між собою співвідношеннями

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial V_m}{\partial t} + \sin \varphi \frac{\partial V_m}{\partial y} = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} R(\varphi, \varphi') \frac{\partial V_n}{\partial z} d\varphi' \\ \frac{\partial V_n}{\partial t} + \sin \varphi \frac{\partial V_n}{\partial z} = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} R(\varphi, \varphi') \frac{\partial V_m}{\partial y} d\varphi' \end{array} \right. \text{ і т.д.,} \quad (3)$$

де

$$R(\varphi, \varphi') = \frac{\sin^2 \varphi'}{\sin^2 \varphi + \sin^2 \varphi' \cos^2 \varphi}. \quad (4)$$

Функція  $R(\varphi, \varphi')$  має в області визначення одну особливу точку:  $\varphi = \varphi' = 0$ , в якій

$$\lim_{\varphi \rightarrow 0} \lim_{\varphi' \rightarrow 0} R(\varphi, \varphi') \neq \lim_{\varphi' \rightarrow 0} \lim_{\varphi \rightarrow 0} R(\varphi, \varphi'). \quad (5)$$

Тому, в цій точці співвідношення (6) замінюються на

$$\frac{\partial^2 V_m}{\partial t^2} = \frac{\partial E_x}{\partial z}, \quad \frac{\partial^2 V_m}{\partial t^2} = \frac{\partial E_x}{\partial y} \text{ і т.д.} \quad (6)$$

Оператор  $\mathbf{A}_{L_p} [u_n(z, t)]_{y, z \in L_p}$  – це нелокальна ТПУ, що накладається на просторово-часові амплітуди  $u_n(z, t)$  хвиль напівнескінченних плоскопаралельних хвилеводів на віртуальних межах  $L_p$ , що співпадають з поперечними перерізами хвилеводів. Цей оператор визначається наступним співвідношенням:

$$\frac{\partial u_n(z, t)}{\partial z} = \mp \sqrt{\varepsilon \mu} \left[ \frac{\partial u_n(z, t)}{\partial t} + s u_n(z, t) + \eta_n \int_0^t u_n(z, \tau) e^{-s(t-\tau)} \frac{J_1(\eta_n(t-\tau))}{t-\tau} d\tau \right], \quad (7)$$

де

$$E_x(y, z, t) = \sum_n u_n(z, t) \mu_n(y), \quad u_n(z, t) = \int_0^W E_x(y, z, t) \mu_n(y) dy, \quad (8)$$

$s = \sigma \eta_0 / 2\varepsilon$ ,  $\eta_n = \sqrt{\lambda_n^2 / \varepsilon \mu - s^2}$ ,  $z$  – поздовжня вісь хвилеводу шириною  $W$ , верхній знак відповідає хвилям, що поширюються в бік додатних  $z$ , нижній – в бік від'ємних,  $J_1(\dots)$  – функція Бесселя і

$$\mu_n(y) = \sqrt{2/W} \sin(\lambda_n y), \quad \lambda_n = \frac{n\pi}{W}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (9)$$

Геометрія початково-крайових задач (рис. 1), що задаються формулами (1)–(4), (6)–(9), може бути відносно довільною, що дозволяє моделювати вкрай широкий клас двовимірних структур. Використання ТПУ – оператори  $\mathbf{A}_{L_p}$  та  $\mathbf{A}_L$  – робить ці початково-крайові задачі, що розглядаються у області аналізу  $\mathbf{Q}_L$ , яка обмежена границями  $L$  і  $L_i$ , еквівалентними до задач, що поставлені у відкритій області, тобто у області, що містить нескінченно віддалену точку (передбачається, що поза межами  $L$  і  $L_i$  немає джерел та розсіювачів електромагнітного поля). Важливо також, що величини  $\varepsilon$ ,  $\mu$  і  $\sigma$  (а також  $\delta$ ) – є функціями як просторових координат  $y$  та  $z$ , так і часу  $t$ .

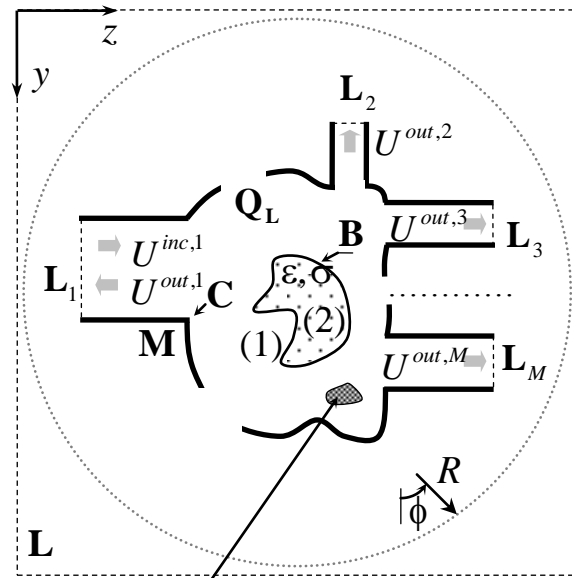
Розв'язок початково-крайових задач на зразок тієї, що наведено вище, виконується методом FDTD [5\*]. Для цього у другому розділі дисертації наведено усі необхідні обчислювальні формули, а саме формули перерахунку компонент поля у регулярних вузлах різницевої сітки, та вузлах, що розташовані на поверхнях металевих і діелектричних об'єктів, наведено різницеві аналоги для операторів  $\mathbf{A}_{L_p}$  і  $\mathbf{A}_L$ , що описують ТПУ на віртуальних межах області  $\mathbf{Q}_L$ , докладно описано оригінальні оптимізовані алгоритми розрахунку каузальних

згорток (7), що дозволяють радикально (в сотні й тисячі разів) зменшувати як час, що потрібний для їх розрахунку, так і об'єм оперативної пам'яті комп'ютера.

Важливою особливістю методу ТПУ є те, що він дозволяє коректно вбудовувати у різницеві схеми імпульсні хвилі, що приходять з напівнескінченних хвилеводів з ненульовою частотою відсічки робочої моди. При використанні техніки PML така можливість є доволі складною, математично необґрунтованою і призводить до неконтрольованого спотворення часового профілю імпульсу збудження. У випадку, коли спектр останнього розташовано поблизу критичної частоти робочої моди, це спотворення може робити його зовсім невпізнаним («*Also, the inadvertent sourcing of reactive below-cutoff fields can muddy the assumed incident distributions.*», [5\*], стор. 230). Умова (7) навпаки точно описує (в залежності від обраного знаку в (7)) як хвилі, що приходять від нескінченності, так і хвилі, що йдуть до неї. Це дозволяє за допомогою (7) точно вбудовувати такі первинні імпульси в різницеві схеми незалежно від розташування їх спектральної смуги відносно критичних частот хвилеводу живлення. Це є одним з важливіших результатів дисертаційної роботи.

Розв'язання початково-крайових задач типу (1), що наведені у розділі 2 дисертації, здійснювалося за допомогою оригінального програмного забезпечення, розробленого автором. Це програмне забезпечення складається з декількох додатків до операційної системи Windows і дозволяє, по-перше, знаходити значення всіх компонент поля у всіх вузлах різницевої сітки у всі часи, до яких було виконано прогін різницевої схеми. По-друге, виділяти з цього величезного об'єму даних інтегральні характеристики об'єкту, що моделюється, як у часовій області, так і у частотній, за допомогою інтегрального перетворення Фур'є

$$\tilde{f}(k) = FT[f(t)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{ikt} dt \leftrightarrow f(t) = FT^{-1}[\tilde{f}(k)] = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(k) e^{-ikt} dk \quad (10)$$



Область зі зовнішнім струмом

Рисунок 1 – Загальний вигляд геометрії двовимірних модельних задач у декартовій системі координат.  $L_i$  – віртуальні межі у перерізах напівнескінченних плоскопаралельних хвилеводів,  $L$  – прямокутна віртуальна межа у вільному просторі,  $M$  і  $B$  – проєкції металевих елементів та поверхонь діелектричних елементів на площину  $(y, z)$ ,  $C$  – проєкції металевих та діелектричних ребер на площину  $(y, z)$

( $k = 2\pi/\lambda$  – хвильове число, або частотний параметр,  $\lambda$  – довжина хвилі у вільному просторі, що відповідає частоті  $k$ ). До таких інтегральних характеристик відносяться зокрема просторово-часові амплітуди хвилевідних мод  $u_n(z, t)$  у перерізах хвилеводів, потоки вектора Пойнтінга  $\vec{S}(t) = [\vec{E}(t) \times \vec{H}(t)]$  через поверхні, що задані користувачем (наприклад, перерізи хвилеводів), діаграми спрямованості випромінювачів  $D(\phi, k)$ , як функції кутової змінної  $\phi$  (рис. 1) і частоти  $k$ , добротності  $Q$  вільних коливань резонаторів, енергетичні коефіцієнти трансформації хвиль на хвилевідних неоднорідностях, та ін. Останні визначаються наступним співвідношенням:

$$W_{mn}^{qp}(k) = \left| \frac{\tilde{u}_m^{sct}(z'_q, k)}{\tilde{u}_n^{src}(z'_p, k)} \right|^2 \frac{\text{Re}\Gamma_m^q}{\Gamma_n^p}, \text{ де } k > \tilde{k}_n^p, \text{ і} \quad (11)$$

$$\Gamma_n^p = \sqrt{k^2 - (\tilde{k}_n^p)^2} \times \begin{cases} \sqrt{\varepsilon_p/\mu_p}, & \text{для } E\text{-поляризованих хвиль} \\ \sqrt{\mu_p/\varepsilon_p}, & \text{для } H\text{-поляризованих хвиль.} \end{cases} \quad (12)$$

Тут  $p$  і  $q$  – номери хвилеводів,  $n$  і  $m$  – номери первинної і розсіяної хвилі у відповідному хвилеводі,  $\varepsilon_p$ ,  $\mu_p$  – параметри середовища, що заповнює  $p$ -й хвилевід (вважається, що втрати в цьому середовищі відсутні:  $\sigma_p = \delta_p = 0$ ),  $\tilde{k}_n^p = \lambda_n^p / \sqrt{\varepsilon_p \mu_p}$  – критичні частоти хвилеводу,  $\lambda_n^p$  – його власні поперечні числа (9). Фур'є-спектри  $\tilde{u}_n^{src}(z'_p, k)$  і  $\tilde{u}_m^{sct}(z'_q, k)$  визначаються з відповідних часових залежностей згідно з (10).

Цей пакет програм було всебічно протестовано на низці канонічних (еталонних) тестових задач. Результати деяких з них також наведені у розділі 2 (а також у [22]). Порівняння результатів, що отримувалися за допомогою розробленого FDTD-солвера, та еталонних дозволило протестувати як окремі розрахункові процедури (формули перерахунку компонент поля у вузлах різницевої сітки, що розташовані у вільному просторі, у діелектрику, на металевих чи діелектричних поверхнях, на віртуальних межах), так і весь розрахунковий алгоритм в цілому. Останнє було можливим завдяки порівнянню інтегральних характеристик об'єкту, що моделювався (наприклад, діаграми спрямованості), значення яких залежали одночасно від усіх розрахункових підпрограм, що складають солвер. У всіх тестах таке порівняння привело до похибок, що на декілька десяткових порядків менші за абсолютні значення величин, що порівнювалися.

На рисунках 2 і 3 наведено результати двох таких «канонічних» тестів. У першому випадку (рис. 2) моделювалося випромінення у вільний простір нескінченною ниткою з рівномірним розподілом стороннього струму. Часову залежність щільності струму цього імпульсу задано функцією

$$J_x(t) = f_{\text{sincos}}(t; A, t_0, t_1, T, k_c, k_s) = A \cdot S(t) \cdot \cos(k_c(t-T)) \cdot \frac{\sin(k_s(t-T))}{t-T}, \quad (13)$$

$$S(t) = x^2(3-2x), \quad x(t) = \begin{cases} (t-t_0)/(T-t_0), & \text{нпу } t_0 \leq t \leq T, \\ (t-t_1)/(T-t_1), & \text{нпу } T < t \leq t_1, \\ 0, & \text{нпу } t < t_0, t > t_1, \end{cases} \quad (14)$$

при наступних значеннях параметрів:  $A=4$ ,  $t_0=0$ ,  $t_1=20$ ,  $T=10$ ,  $k_c=6$ ,  $k_s=4$  (рис. 2(б)). В цьому тесті проводилося порівняння значень електричної компоненти поля  $E_x(g, t)$ , що згенеровано таким імпульсом струму у фіксованій точці  $g = \{y, z\}$  вільного простору, які розраховані за допомогою FDTD-солвера, та еталонних  $E_{x,etalon}(g, t)$  (рис. 2(г)), обчислених за допомогою функції Гріна двовимірного оператора Даламбера [6\*]:

$$G(\vec{\rho} - \vec{\rho}', t - t') = \begin{cases} -\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{(t-t')^2 - |\vec{\rho} - \vec{\rho}'|^2}}, & t - t' > R, \\ 0, & t - t' < R. \end{cases} \quad (15)$$

(Тут  $\vec{\rho}$ ,  $t$  і  $\vec{\rho}'$ ,  $t'$  – відповідно координати точок спостереження  $g$  і джерела  $S$  в просторі і часі,  $R = |\vec{\rho} - \vec{\rho}'|$  – відстань між ними.) Абсолютна похибка  $E(g, t) = E_x(g, t) - E_{x,etalon}(g, t)$  (рис. 2(д)) складається з похибки скінченно-різницевої апроксимації задачі (1) і похибки квадратурних формул, за допомогою яких було обчислено  $E_{x,etalon}(g, t)$ . Величина  $E(g, t)$  приблизно на три десяткових порядки менша за абсолютні значення  $E_x(g, t)$ , що можна вважати гарним співпадінням  $E_x(g, t)$  і  $E_{x,etalon}(g, t)$ .

У другому випадку моделювалося збудження ступінчастого розширення (рис. 3 (а)) плоскопаралельного хвилеводу в  $H$ -площині  $TE_1$ -хвилею. Ширина хвилеводу  $W = 1$  см, розміри розширення  $d_1 = 1,6$  см і  $d_2 = 0,9$  см. Для такої хвилевідної неоднорідності розраховувався енергетичний коефіцієнт відбиття  $R(f) = W_{11}^{11}(f)$  (11) як функція частоти в діапазоні, в якому хвилевід підтримує поширення тільки однієї власної моди ( $15 < f < 30$  ГГц). Цей коефіцієнт (рис. 3(б), чорна крива), отриманий розробленим FDTD-солвером, з графічною точністю збігається з коефіцієнтом  $R'(f)$ , отриманим за допомогою програмного продукту *CST Microwave Studio* та з коефіцієнтом  $R''(f)$ , розрахованим методом часткових областей [8\*, 9\*]. (Залежність  $R''(f)$  отримана С.О. Стешенком, лабораторія обчислювальної електродинаміки відділу теорії дифракції і дифракційної електроніки, ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України.) Різниця  $E' = R(f) - R'(f)$  (рис. 3(б), червона крива) не перевищує по модулю



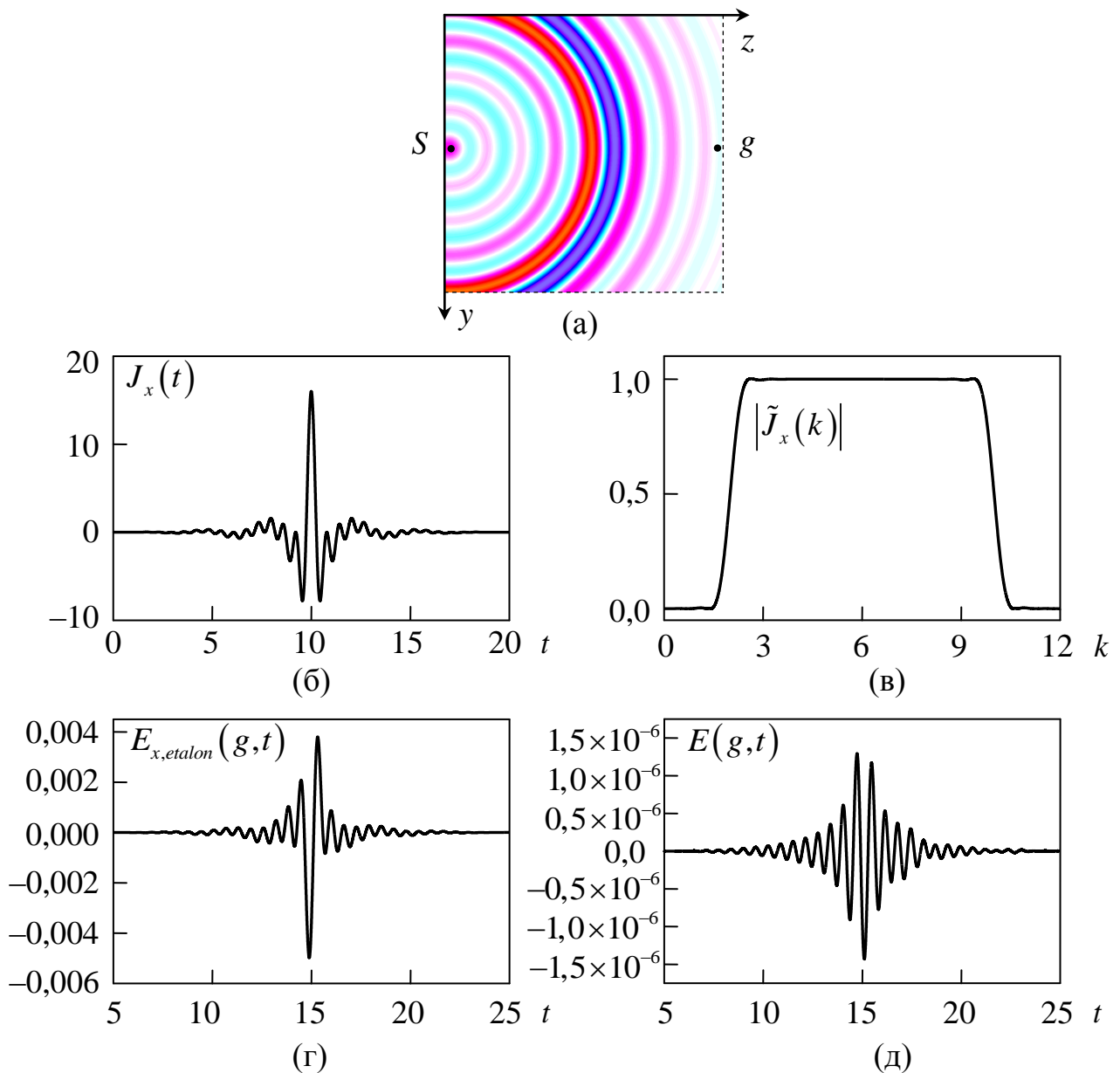


Рисунок 2 – Результати тестування розробленого пакета програм: (а) – електромагнітний імпульс, що випромінений у вільний простір нескінченною ниткою, яка розташована в точці  $S$ ; (б) – часова залежність (13) щільності стороннього струму, що протікає у нитці; (в) – його амплітудний спектр (8); (г) – поле  $E_{x,etalon}(g,t)$  в точці спостереження  $g$ , яка розташована на відстані  $R=5$  від нитки зі струмом, розраховане за допомогою функції Гріна (15); (д) – абсолютна похибка  $E(g,t) = E_x(g,t) - E_{x,etalon}(g,t)$ , що допущена при обчисленні  $E_x(g,t)$  різницеvim методом

0,06, а різниця  $E'' = R(f) - R''(f)$  (рис. 3(б), синя крива) – 0,01, що, з огляду на наближений характер величин  $R$ ,  $R'$  і  $R''$ , можна вважати задовільним співпадінням.

Насамкінець зроблено короткий огляд перспективних подальших досліджень методу ТПУ, які спрямовані на можливу оптимізацію розрахункових алгоритмів (зокрема покращення спадання ядер у каузальних згорток виду (7) та

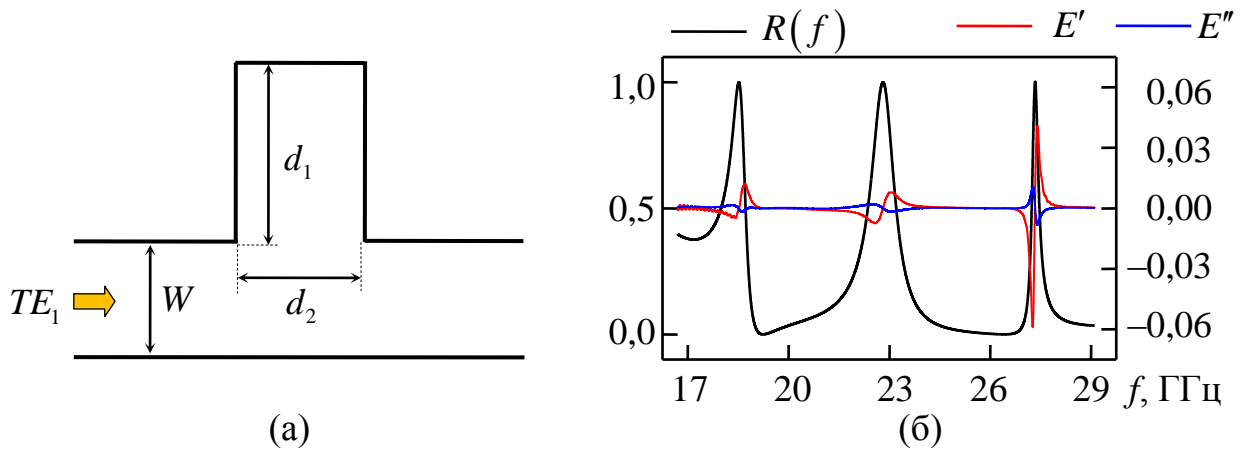


Рисунок 3 – Результати тестування розробленого пакета програм: (а) – геометрія хвильовідного розширення в  $H$ -площині, (б) – енергетичний коефіцієнт відбиття  $R(f)$   $TE_1$ -хвилі як функція частоти і оцінки абсолютної похибки, отримані шляхом обчислення  $R$  різними методами

їх усікання) та можливе застосування ТПУ при моделюванні дифракції імпульсних хвиль на періодичних структурах (двоєко періодичних ґратках, фотонних кристалах та ін.).

**Розділ 3** дисертації присвячено проблемам коректного моделювання пасивного (дисперсійного) стискання ЕМІ у хвильовідних трактах або середовищах з дисперсією групової швидкості. Ці проблеми, насамперед, стосуються точного визначення часових профілів імпульсів, що подаються на вхід таких дисперсійних елементів. Тут запропоновано використання методу обернення хвильового фронту (ОХФ) [10\*] та сформульовано базовий алгоритм проведення чисельних експериментів за допомогою цього методу. Цей алгоритм складається з таких основних кроків. Перший – завдання часового профілю цільового імпульсу (або objective pulse), тобто імпульсу, що необхідно отримати у результаті компресії. Другий – розв’язання задачі поширення/дифракції цього імпульсу у хвильовідному тракті або іншому елементі з дисперсією групової швидкості. Третій – виділення з отриманого розв’язку часового профілю хвилі, що пройшла крізь дисперсійний елемент, розвертання його у часі (тобто виконання заміни змінної часу  $t \rightarrow T - t$ , де  $T$  – деякий часовий параметр, що залежить від конкретної задачі) і повторне розв’язання задачі поширення/дифракції отриманого імпульсу у дисперсійному елементі. В підсумку, за умови відсутності втрат, на виході з дисперсійного елемента буде отримано імпульс з заданим часовим профілем. За допомогою такого алгоритму було проведено низку чисельних експериментів, в яких моделювалося пасивне стискання ЕМІ у різноманітних хвильоведучих структурах.

У підрозділах 3.2 і 3.3 вивчено стискання амплітудно- та частотно-модульованих ЕМІ у прямолінійних та вигнутих відрізках порожнистих хвильоводів з ідеально провідними металевими стінками. У рамках чисельних експериментів, що було проведено, знайдено закони амплітудної  $A(t)$  та частотної  $k(t)$  модуляцій вхідних імпульсів для таких хвильовідних секцій. Показано, що при точному визначенні залежностей  $A(t)$  і  $k(t)$  можливо досягти

50-кратного стискання вхідного імпульсу при коефіцієнті посилення пікової потужності  $\tilde{G} \approx 76$  на довжині плоскопаралельного хвилеводу, що дорівнює 1000 його поперечних розмірів. Доведено нездатність поширеного кінематичного наближення [1\*, 11\*] для коректного визначення залежностей  $A(t)$  і  $k(t)$ . Також продемонстровано теоретичну можливість стискання у таких хвилеводах імпульсів з шириною частотної смуги в дві октави (рис. 4).

У підрозділі 3.4 промодельовано стискання ЕМІ у відрізьку планарного діелектричного хвилеводу (рис. 5). Імпульс, що стискався, приходив з хвилевідного рупору  $I$ , проходив вздовж діелектричного хвилеводу і фіксувався у прийомному рупорі  $II$ . Матеріал, з якого виготовлено діелектричний хвилевід, дисперсії не має ( $\varepsilon(\omega) = const$ ), але є дисперсія групової швидкості, яка притаманна самому хвилеводу (хвилі різної довжини в різній мірі пов'язані з направляючою лінією передачі і, відповідно, мають різну швидкість поширення). Така відкрита хвилевідна лінія має втрати на випромінювання у відкритий простір, тому формальне відтворення основних кроків алгоритму для проведення методом ОХФ чисельних експериментів, що були наведені вище, не приведе до бажаного часового профілю стиснутого імпульсу. Але є можливість компенсувати втрати, що зазнає ЕМІ під час поширення крізь структуру, що розглядається, додатковою енергією у первинному імпульсі. Для цього цільовий імпульс  $u_1^{obj}(t)$  ( $u_1(t) \equiv u_1(z, t)|_{z=const}$  – просторово-часова амплітуда (8)) пересилався з одного рупору до іншого, де фіксувався імпульс  $u_1^{tran}(t)$  і розраховувалося відношення

$$\xi(k) = \frac{|\tilde{u}_1^{obj}(k)|}{|\tilde{u}_1^{tran}(k)|}. \quad (16)$$

Ця величина дозволяє визначити часовий профіль вхідного імпульсу з урахуванням втрат у дисперсійній лінії передачі:

$$u_1^{src*}(t) = FT^{-1} \left[ \xi^2(k) \cdot FT \left[ u_1^{tran}(T-t) \right] \right], \quad (17)$$

де  $T$  – деякий часовий параметр, що залежить від конкретної задачі, що розв'язується,  $FT[\dots]$  і  $FT^{-1}[\dots]$  задано (10).

На рис. 6 наведено часові та спектральні характеристики імпульсу, розраховані за допомогою такої техніки, для хвилевідного вузла, що показано на рис. 5. Ширина частотної смуги, що займає ЕМІ, дорівнює приблизно 1-й октаві. Часовий профіль та спектр цільового імпульсу, що було задано функцією  $u_1^{obj}(t) = f_{sincos}(t; 4, 0, 50, 25, 4, 7, 1, 5)$  (13), відтворено у приймальному рупорі з точністю не гірше двох десяткових знаків. При довжині діелектричного хвилеводу  $L + 2L_2 \approx 161$  ( $W = 1$ ) одержаний коефіцієнт компресії (відношення тривалостей вхідного і вихідного сигналів) склав величину  $\beta = 4,4$ , коефіцієнт

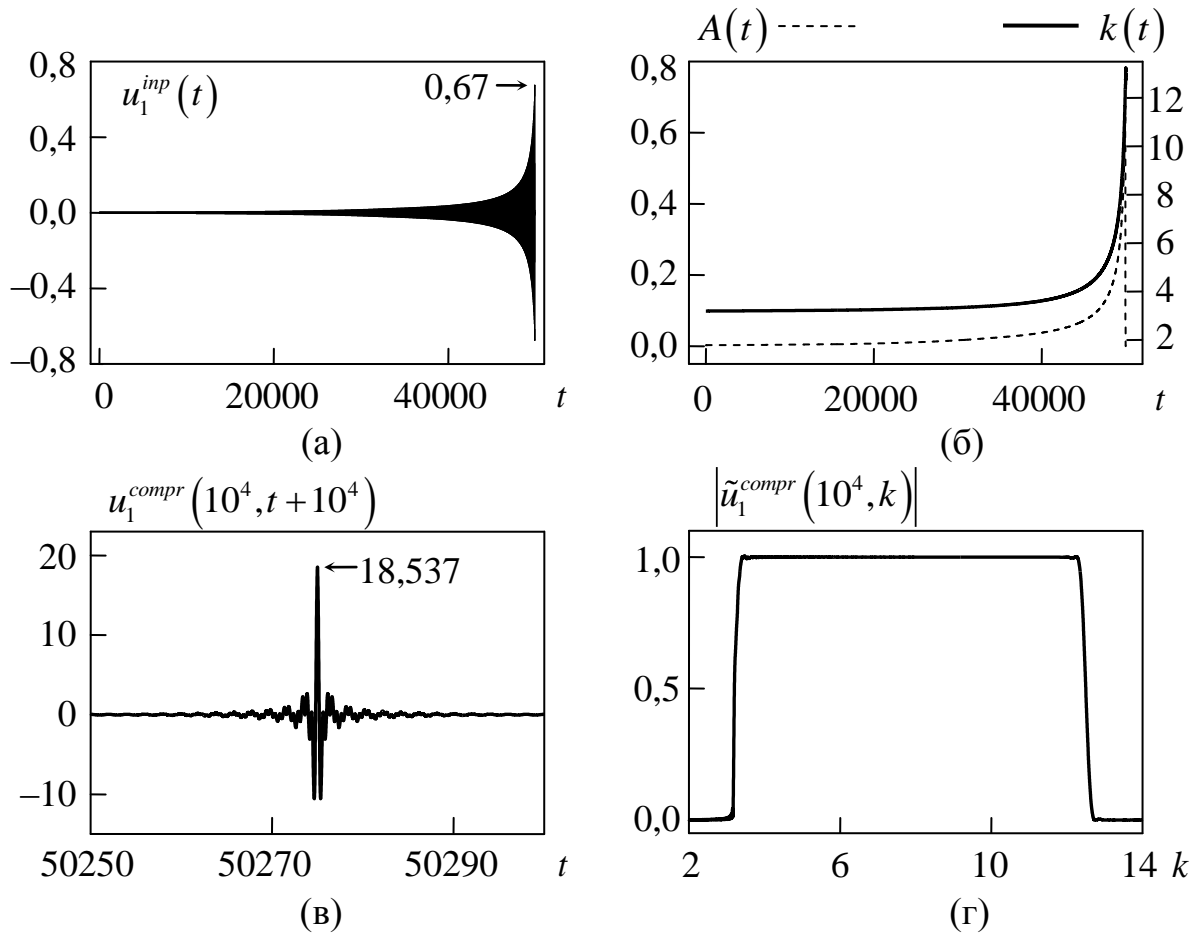


Рисунок 4 – Часовий профіль вхідного імпульсу, що стискається у секції порожнистого плоскопаралельного хвилеводу (а), його закони амплітудної і частотної модуляцій (б). Стиснутий імпульс (в) і його амплітудний спектр (г). Цільовий імпульс задано функцією  $f_{\text{sinco}}(t; 4, 0, 50, 25, 7, 85, 4, 65)$  (13) з піковим значенням 18,6. Довжина хвилевідної секції  $L = 10^4$ , ширина  $W = 1$ , критичні частоти  $TE_n$  – хвиль дорівнюють  $\tilde{k}_n = n\pi$  ( $n = 1, 2, \dots$ ). Ширина смуги частот, яку займає імпульс, дорівнює приблизно двом октавам

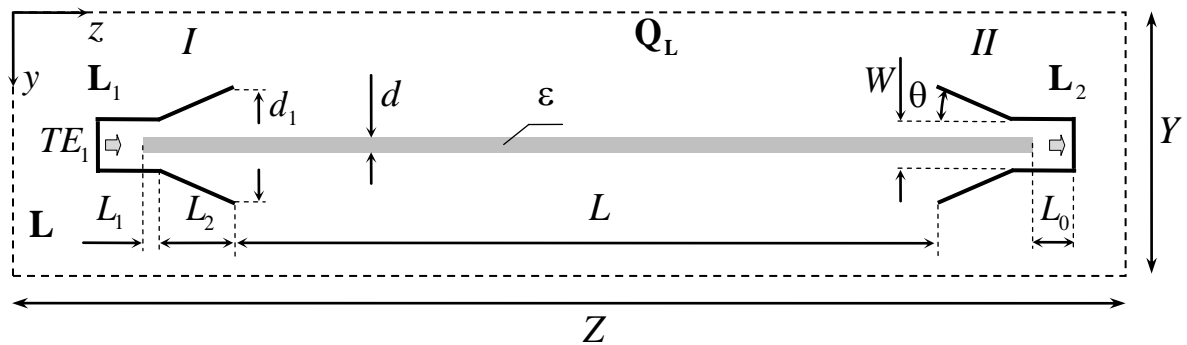


Рисунок 5 – Геометрія задачі, в якій моделювалося стискання ЕМІ у відрізьку планарного діелектричного хвилеводу

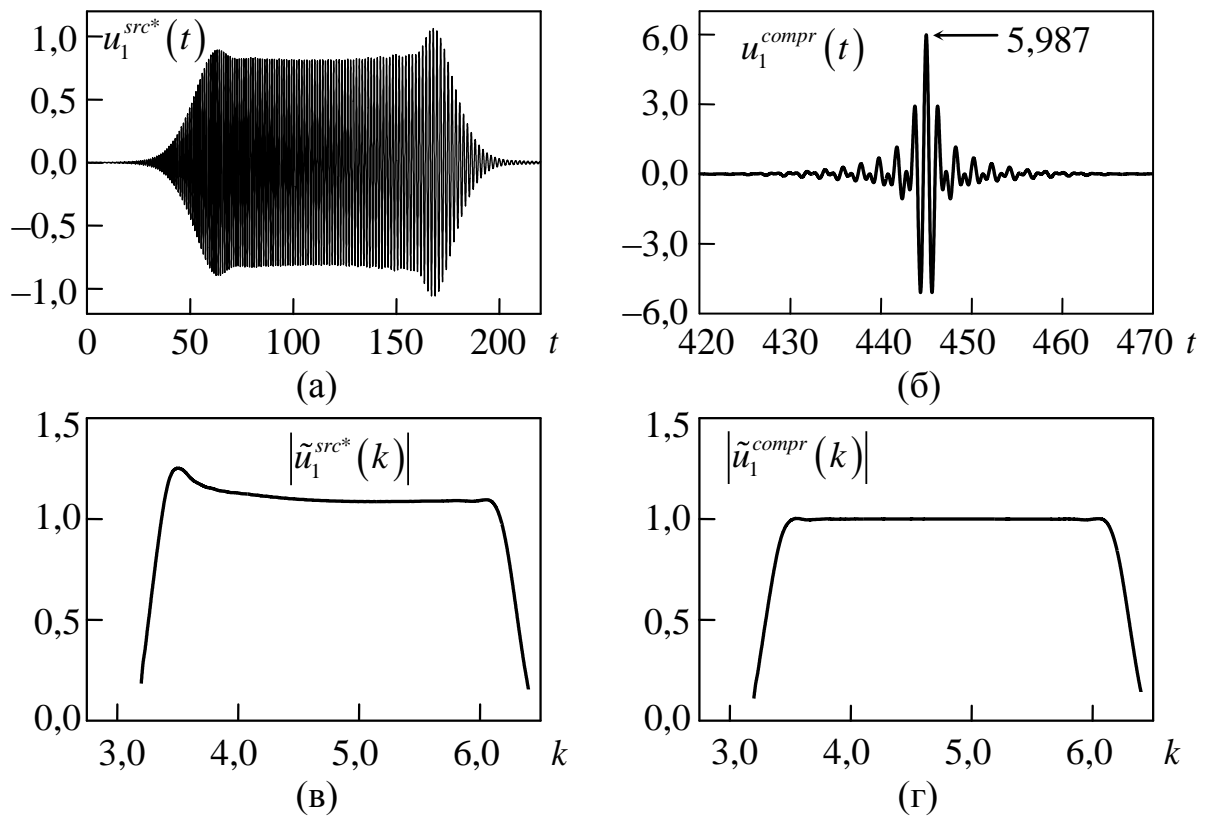


Рисунок 6 – Часовий профіль вхідного  $u_1^{src*}(t)$  (а) і вихідного  $u_1^{compr}(t)$  (б) імпульсів для хвилевідного вузла, що показано на рис. 5, та їх амплітудні спектри (в) і (г)

підсилення по піковій потужності (відношення квадратів максимумів напруженостей поля в обох імпульсах)  $\tilde{G} \approx 31$ .

Така техніка компенсації втрат у дисперсійному елементі виявилася вкрай продуктивною, і у наступних підрозділах було отримано низку її важливих узагальнень.

У підрозділі 3.5 розглянуто класичну задачу випромінювання нитки стороннього струму у плоскопаралельному хвилеводі. Тут, методом ОХФ, розв'язано задачу визначення часового профілю стороннього струму за заданим профілем ЕМІ, що генерується таким струмом у заданому поперечному перерізі хвилеводу. Така задача має аналітичний розв'язок у частотній області [12\*]. Метод ОХФ, оснащений технікою компенсації втрат множителем  $\xi^2(k)$  (15), також дозволив отримати розв'язок цієї задачі, що співпав з [12\*]. При цьому за відсутності омичних та радіаційних втрат в системі, що розглядається, множник  $\xi^2(k)$  компенсує опір випромінювання, – величину, що відображає той факт, що енергія на різних частотах випромінюється з різною ефективністю. Таке важливе узагальнення методу ОХФ, що отримано у цьому підрозділі, дозволяє у подальшому моделювати стискання ЕМІ, що індуковані сторонніми струмами у хвилевідних дисперсійних елементах довільної геометрії.

У підрозділі 3.6 розглянуто модель імпульсного випромінювача, в якому здійснюється дисперсійне стискання ЕМІ в апертурі (рис. 7). Було розв'язано задачу визначення профілю первинної імпульсної хвилі (її законів модуляції)

хвилеводу живлення (у перерізі  $L_1$ ) по заданому профілю електромагнітного поля у точках спостереження  $g_1$  (на вістрі антени) і  $g_2$  (у вільному просторі). Метод ОХФ дозволив точно визначити форму цих двох імпульсів при наявності дисперсії у відрізку порожнистого хвилеводу і у клиновидному звуженні та при наявності радіаційних втрат. Оскільки розрахунковий алгоритм, що було розроблено, не є чутливим до того, де локалізовано точку спостереження поля, її можна розташовувати будь де, – наприклад, всередині людського тіла або під поверхнею ґрунту, що відкриває перспективи використання ОХФ у задачах підповерхневого зондування.

У підрозділі 3.7 методом ОХФ вивчено можливість пасивного стискання модульованих ЕМІ у хвилевідному вузлі, що містить відрізок жолобкового хвилеводу (рис. 8). Частотна смуга, яку займає імпульс, що стискається, розташована в діапазоні від приблизно 25 ГГц до 45 ГГц (тобто потрапляє у довгохвильову частину міліметрового діапазону). Плавні переходи між прямокутними ( $7,2 \times 3,4 \text{ мм}^2$ ) і жолобковим хвилеводами [13\*] дозволили зменшити втрати на випромінювання та відбиття від хвилевідних неоднорідностей до рівня, що менший 1,5% від енергії хвилі, що падає, у всьому робочому діапазоні частот. Тому, у такій системі втрати визначаються переважно скінченною провідністю металевих (мідних) стінок хвилеводу. Множник  $\xi^2(k)$  дозволив точно компенсувати (див. (14), (15)) ці втрати і точно розрахувати форму вхідного імпульсу. Для секції довжиною 1,5 м, що зображена на рис. 8, отримано коефіцієнт компресії, що приблизно дорівнює 20, при коефіцієнті корисної дії  $\gamma \approx 0,81$  (коефіцієнт посилення пікової потужності  $\tilde{G} \approx 17$ ).

У підрозділі 3.8 метод ОХФ використано для моделювання пасивної компресії ЕМІ у ланцюжку зв'язаних хвилевідних резонаторів (рис. 9). Вивчено фізику утворення смугових характеристик такого об'єкта, яке є наслідком збудження у ланцюжку резонаторів власних коливань з різною просторовою структурою стоячих хвиль. Промодельовано стискання ЕМІ у такому дисперсійному елементі у випадку, коли розміри вікон зв'язку  $d_3$  складають 9/10 від ширини хвилеводу  $W$ , тобто власне ланцюжок було трансформовано до хвилеводу зі стінками, що гофровані періодичними металевими виступами. Зроблено висновок про необхідність попередньої оптимізації геометрії такої

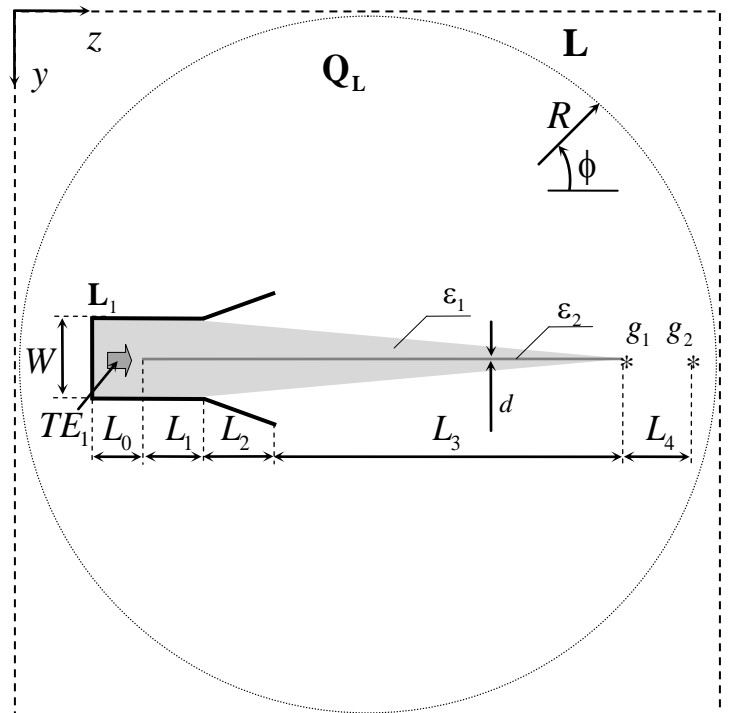


Рисунок 7– Модель імпульсного випромінювача

дисперсійної системи методами, що вимагають менших комп'ютерних ресурсів ніж метод FDTD. Наприклад, методом часткових областей [8\*, 9\*] або методом Рімана-Гільберта [14\*].

У підрозділі 3.9 виконано моделювання – методом ОХФ – стискання оптичних та інфрачервоних імпульсів у кристалах з дисперсією діелектричної проникності  $\varepsilon = \varepsilon(\omega)$ . Задачі, які було розглянуто, одновимірні, тобто розглядалося поширення плоских імпульсних хвиль у необмеженому просторі, що заповнений діелектриком з дисперсією. Тому було використано просту розрахункову формулу частотної області для визначення профілю імпульсу в площині  $z = z_1$  по заданому профілю в площині  $z = z_0$  [15\*]:

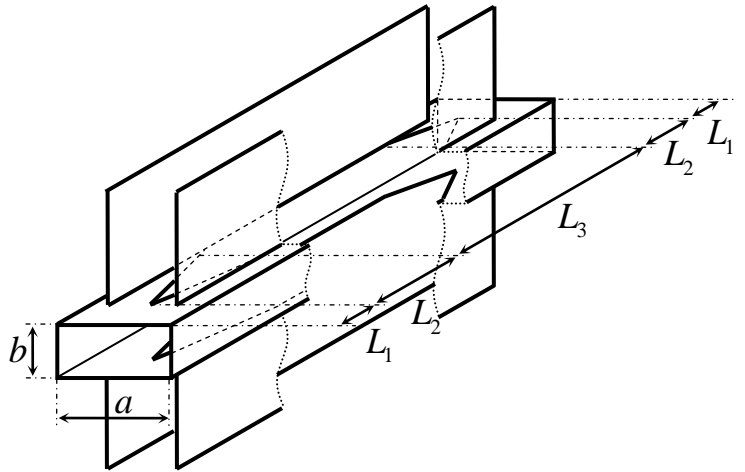


Рисунок 8 – Хвилевідний вузол, що містить відрізок жолобкового хвилеводу і плавні переходи до хвилеводу прямокутного перерізу

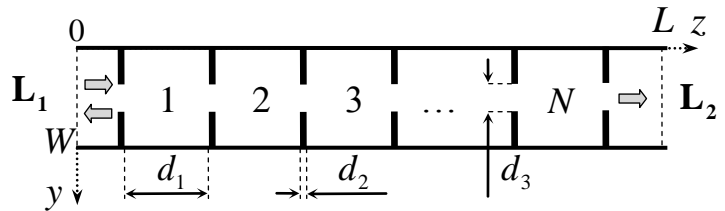


Рисунок 9 – Ланцюжок зв'язаних хвилевідних резонаторів

$$\tilde{u}(z_1, k) = \tilde{u}(z_0, k) e^{i\sqrt{\varepsilon} \cdot k \cdot (z_1 - z_0)} = \tilde{u}(z_0, k) e^{inkL}, \quad (18)$$

( $z$  – вісь декартової системи координат, вздовж якої поширюється імпульс,  $L$  – відстань між площинами  $z = z_0$  і  $z = z_1$ ). Розглянуто п'ять оптичних кристалів: GaAs, ZnTe, LiF, RbI і CsCl. Залежності  $n^2 = \varepsilon(\lambda)$  від довжини хвилі у вільному просторі  $\lambda$  для цих кристалів було задано відомими формулами Селмейера [16\*], і в області визначення цих функцій було дві підобласті: з нормальною  $d^2n/d\lambda^2 > 0$  (довгохвильові складові імпульсу поширюються швидше короткохвильових) і аномальною  $d^2n/d\lambda^2 < 0$  (навпаки) дисперсією групової швидкості. У першому випадку спектр імпульсів, що стискалися, припадав переважно у оптичний діапазон, у другому – у інфрачервоний. У табл. 1 наведено основні параметри компресії імпульсів для цих кристалів для обох випадків дисперсії: коефіцієнт посилення по піковій потужності  $\tilde{G}$ , коефіцієнт стискання  $\beta$  та тривалість головної «пелюстки» (тобто півхвилі, в якій зосереджено більшу частину енергії імпульсу) стиснутого імпульсу  $\Delta$  (фс). Данні цієї таблиці демонструють можливість стискання імпульсів з шириною частотної смуги до 4-х октав і вище і досягнення коефіцієнтів посилення  $\tilde{G}$  понад 60 дБ на 1-му метрі

кристала. Також за допомогою такої техніки компресії можливе отримання імпульсів з субфемтосекундною тривалістю головної частини.

У підрозділах 3.10 і 3.11 обговорюються перспективні напрямки подальших досліджень з використанням методу ОХФ, та формулюються основні результати, що отримані в розділі 3.

Таблиця 1 – Данні чисельного моделювання компресії імпульсів у кристалах

	смуга частот	$\tilde{G}$	$\beta$	$\Delta$
GaAs	1 ÷ 6 мкм ( $\approx 2,6$ октави)	72 085 ( $\approx 48,5$ дБ)	8 500	1,91
	8,5 ÷ 17 мкм ( $\approx 1$ октава)	1 175 ( $\approx 30,7$ дБ)	545	18,73
ZnTe	0,6 ÷ 4,8 мкм ( $\approx 3$ октави)	173 548 ( $\approx 52,4$ дБ)	15 300	1,78
	7 ÷ 28 мкм ( $\approx 2$ октави)	851 ( $\approx 29,3$ дБ)	2 050	18,61
LiF	0,12 ÷ 1 мкм ( $\approx 3$ октави)	362 750 ( $\approx 55,6$ дБ)	7 600	0,36
	1,65 ÷ 10 мкм ( $\approx 2,6$ октави)	4 400 ( $\approx 36,4$ дБ)	9 000	4,72
RbI	0,25 ÷ 4 мкм ( $\approx 4$ октави)	1 096 440 ( $\approx 60,4$ дБ)	28 360	0,80
	7,5 ÷ 60 мкм ( $\approx 3$ октави)	587 ( $\approx 27,7$ дБ)	4 800	21,86
CsCl	0,185 ÷ 2,96 мкм ( $\approx 4$ октави)	229 240 ( $\approx 53,6$ дБ)	32 700	0,58
	4,75 ÷ 38 мкм ( $\approx 3$ октави)	949 ( $\approx 29,7$ дБ)	4 700	13,94

**Розділ 4** дисертації присвячено моделюванню та вивченню фізики активної компресії НВЧ імпульсів. За допомогою розробленого автором програмного забезпечення, що реалізує розв'язок початково-крайових задач, які описані у розділі 2, було проведено низку чисельних експериментів, у яких виконано модельний синтез найважливіших вузлів активних компресорів різної геометрії. В рамках цих чисельних експериментів розроблено загальну схему синтезу таких резонансних пристроїв. Ця схема полягає у декомпозиції всього об'єкту, що синтезується, на декілька простих резонансних вузлів, точного налаштування кожного з них на потрібну частоту, їх подальшого стикування (узгодження) між собою, випробування складеного вузла у режимі накопичення енергії і, насамкінець, у режимі її скидання. Такі основні кроки дозволяють точно налаштувати накопичувальні резонатори компресорів на потрібні режими роботи, та контролювати їх параметри при додаванні нових елементів.

У підрозділах 4.2 і 4.3 за такою схемою виконано модельний синтез компресорів з накопиченням енергії у  $TM_{01n}$  коливаних циліндричного (рис. 10(а)) та у  $TE_{01n}$  коливаних прямокутних резонаторів (рис. 10(б)). Перемикачем компресора з режиму накопичення в режим скидання в першому випадку слугувала радіальна запірна щілина у внутрішньому провіднику відвідного коаксіального хвилеводу, у другому випадку – активна ґратка у поперечному перерізі хвилеводу. Для таких прототипів компресорів вдалося досягти



тривалостей вихідних імпульсів, близьких до теоретичного граничного значення, що дорівнює подвоєному часу поширення хвилі вздовж накопичувального резонатора і коефіцієнтів стискання і посилення потужності відповідно  $\beta \approx 190$ ,  $G \approx 97$  і  $\beta \approx 465$ ,  $G \approx 290$ .

У підрозділі 4.4 розглянуто дві моделі активного компресора з накопиченням енергії у  $TE_{01n}$ -коливанні прямокутного резонатора і перемикачем в  $H$ -площинному запірному розширенні. Сам резонансний об'єм складався з відрізка одномодового плоскопаралельного (прямокутного) хвилеводу. Геометрію першої моделі схематично зображено на рис. 11(а). Вона складається з двох портів вводу/виводу енергії і є найпоширенішою схемою, за якою конструюють активні компресори. Друга модель (рис. 11(б)) містить три порти вводу/виводу і є оригінальною схемою.

Було встановлено, що резонатор, побудований за двопортовою схемою, може функціонувати як в режимі резонансного проходження первинної хвилі, так і в режимі її резонансного відбиття. Це

ілюструється на рис. 12, де показано коефіцієнт проходження  $T(k)$  через резонатор  $TE_1$ -хвилі. Варіація довжини резонатора  $L$  приводить до зміщення максимуму кривої  $T(k)$  і не зміщує її мінімум (що дорівнює нулю). Для фіксованої конфігурації «плям» стоячої хвилі (рис. 12(а)), що збуджується у резонаторі, існує два значення  $L_1$  і  $L_2$  довжини резонатора, при яких  $T(k_{res})=1$ , але максимальна добротність робочого коливання (рис. 12(б)) досягається у випадку, коли  $L_1 < L < L_2$  і у кривій  $T(k)$  максимум (екстремум) взагалі відсутній. Це робить такі популярні на практиці конструкції вкрай незручними для їх налаштування й експлуатації в режимі найвищої добротності.

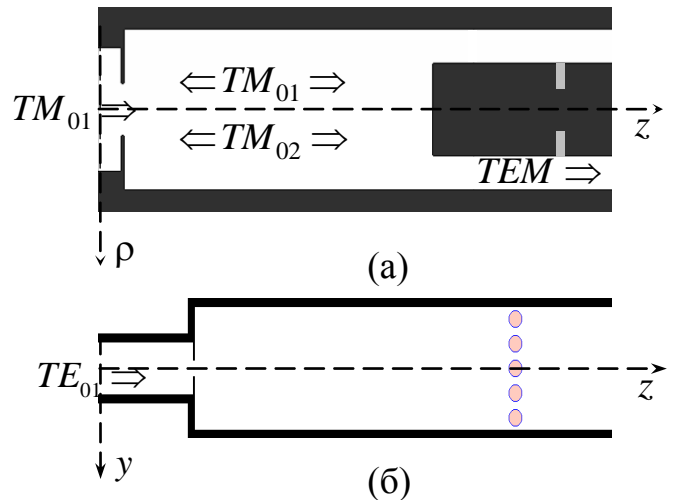


Рисунок 10 – Геометрія накопичувального резонатора на відрізку циліндричного (а) та прямокутного (б) хвилеводів

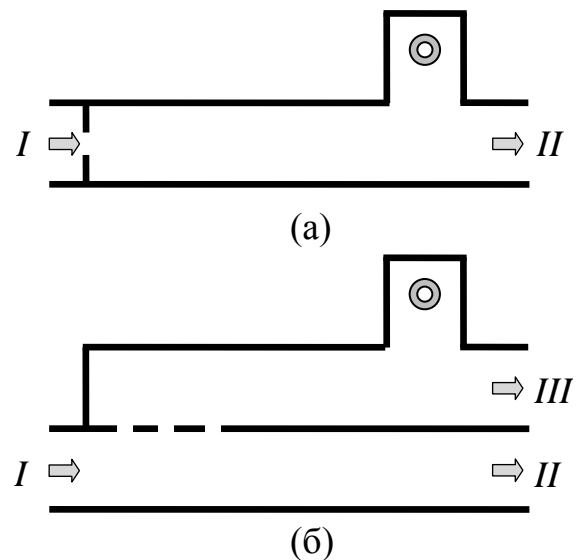


Рисунок 11 – Геометрія двопортового (а) і трипортового (б) накопичувального резонатора активного компресора ЕМІ

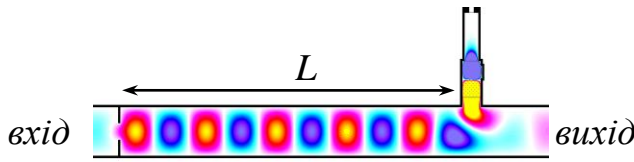
Трипортова схема з щілинами зв'язку у бічній стінці резонатора більш зручна для цього. Такий резонатор збуджується лише у режимі резонансного відбиття хвилі накачки (рис. 13). Максимальна добротність досягається при  $R=1$ .

На рис. 14 показано приклади часових залежностей стиснутих імпульсів на виході двопортового і трипортового компресорів. Досягнуті коефіцієнти посилення потужності у цих випадках склали  $\tilde{G} \approx 106$  і  $\tilde{G} = 844$ .

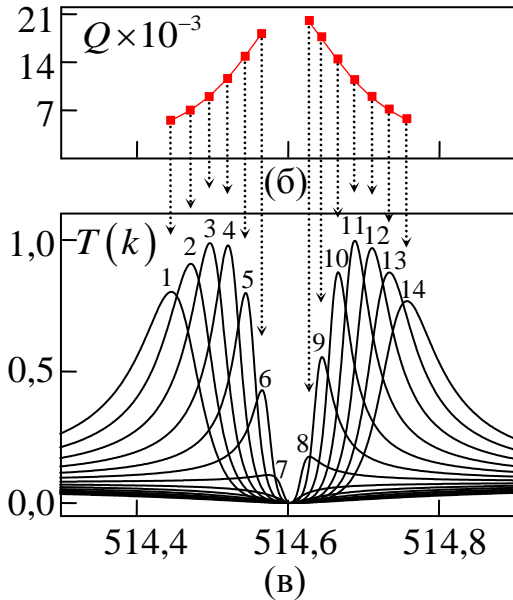
У підрозділі 4.5 синтезовано прототип двоступеневого активного компресора з відкритим дводзеркальним резонатором у першому ступені (рис. 15). Принцип дії подібних двоступневих компресорів базується на ефекті повної перекачки енергії між двома зв'язаними резонаторами, що налаштовані (окремо один від одного) на одну й ту ж частоту. При цьому у першому ступені використовується високодобротне коливання, у якому здійснюється накопичення енергії, а коливання у другому ступені відносно низькодобротне, і тут відбувається просторове стискання енергії, яка накопичена у першому ступені.

У компресорі, що було розглянуто, перемикання режимів накопичення енергії у першому ступені, її перекачування у другий і скидання у відповідний хвилевід здійснюється зміною питомої провідності в об'ємі, що утворює активний елемент у запірному розширенні хвилеводу (другий ступень). На відміну від одноступневих конструкцій (див. вкладки до рис. 14), тут залежність  $\sigma(t)$  містить дві перехідних ділянки: від  $\sigma_{max}$  до 0 і від 0 до  $\sigma_{max}$  (рис. 14). На першій з них відбувається формування резонансного об'єму другого ступеня, на другій – скидання накопиченої енергії у відповідний хвилевід. Такі зміни провідності локального об'єму резонатора можуть бути реалізовані за допомогою зовнішнього джерела вільних електронів (електронною гарматою) [17\*].

На рис. 16 показано динамічні характеристики синтезованого компресора. Розміри резонатора першого ступеня (рис. 15):  $r=300$  мм,  $d=315$  мм,  $D=350$  мм, ширина підвідного і відвідного хвилеводів  $W=10$  мм (ширина вікон зв'язку  $w=3,5$  мм). Стояча хвиля робочого коливання першого ступеня складається з 43-х пучностей у повздовжньому напрямку (між дзеркалами) і 13-ти у поперечному. Його добротність  $Q \approx 36\,500$ , частота  $\tilde{k}_{res} \approx 493,410\,372 \text{ м}^{-1}$ . Стояча хвиля коливання у другому ступені складається з 8-ми пучностей поля у хвилевідному плечі накопичувального резонатора і 2-х у його запірному розширенні в  $H$ -площині. Його добротність  $Q \approx 2\,800$ , частота  $\tilde{k}_{res}^{(2)} \approx 493,412 \text{ м}^{-1}$ . Імпульс накачки має тривалість 750 м (або приблизно 2,5 мкс), носівну частоту  $\tilde{k}_{res}$  та обвідну функції  $u_1(t)$  (3) одиничного рівня. В інтервалі  $743,873 < t < 744$  відбувається зміна провідності активного елемента з  $\sigma_{max}$  до 0, після чого починається процес перекачки накопиченої у дводзеркальному резонаторі енергії (рис. 16(a)) у резонатор другого ступеня. У момент часу  $t=760,8$  м накопичену в першому ступені енергію за вирахуванням радіаційних втрат практично повністю перекачано у другу (рис. 16(b)), після чого перший резонатор починає зворотне перекачування енергії. (Строго кажучи, тут спостерігалось квазіповне перекачування енергії. Внаслідок того, що частоти двох резонаторів  $\tilde{k}_{res}$  і  $\tilde{k}_{res}^{(2)}$  відрізняються у шостому десятковому знакові, частина енергії залишається

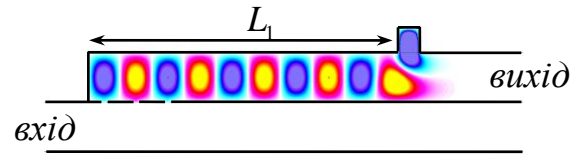


(a)

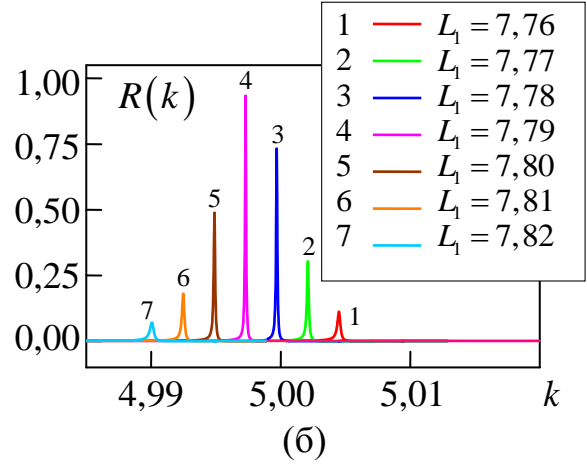


(b)

Рисунок 12 – Структура стоячих хвиль, що збуджуються у двопортовому резонаторі на частотах, які відповідають максимумам  $T(k)$  (а); добротності  $Q$  відповідних коливань (б); коефіцієнт проходження  $T(k)$  через резонатор (в).  
Номера 1, 2, ..., 14 відповідають значенням  $L = 75,2, \dots, 73,9$  мм. Ширина хвилеводу  $W = 10$  мм

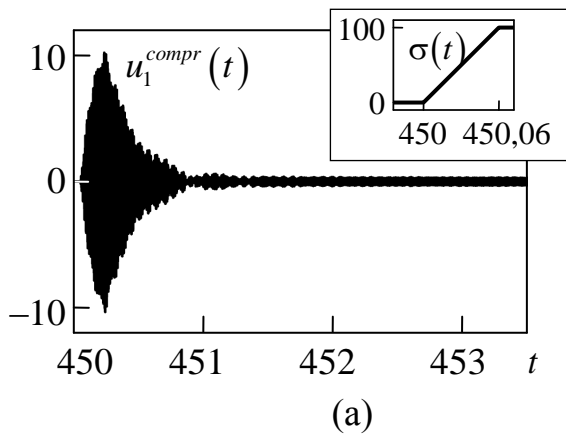


(a)

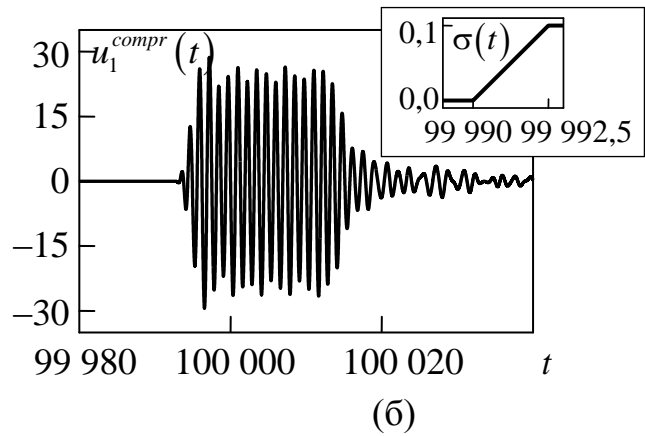


(b)

Рисунок 13 – Структура стоячих хвиль, які збуджуються у трипортовому резонаторі на частотах, що відповідають максимумам  $R(k)$  (а); коефіцієнт відбиття  $R(k)$  від резонатора (б).  
Номера 1, 2, ..., 7 відповідають значенням  $L_1 = 7,76, \dots, 7,82$ . Ширина хвилеводів  $W = 1$



(a)



(b)

Рисунок 14 – Амплітуди  $u_1^{compr}(t)$  сформованих двопортовим (а) і трипортовим (б) компресорами імпульсів. У вставках показано залежність від часу питомої провідності об'єму активного елемента

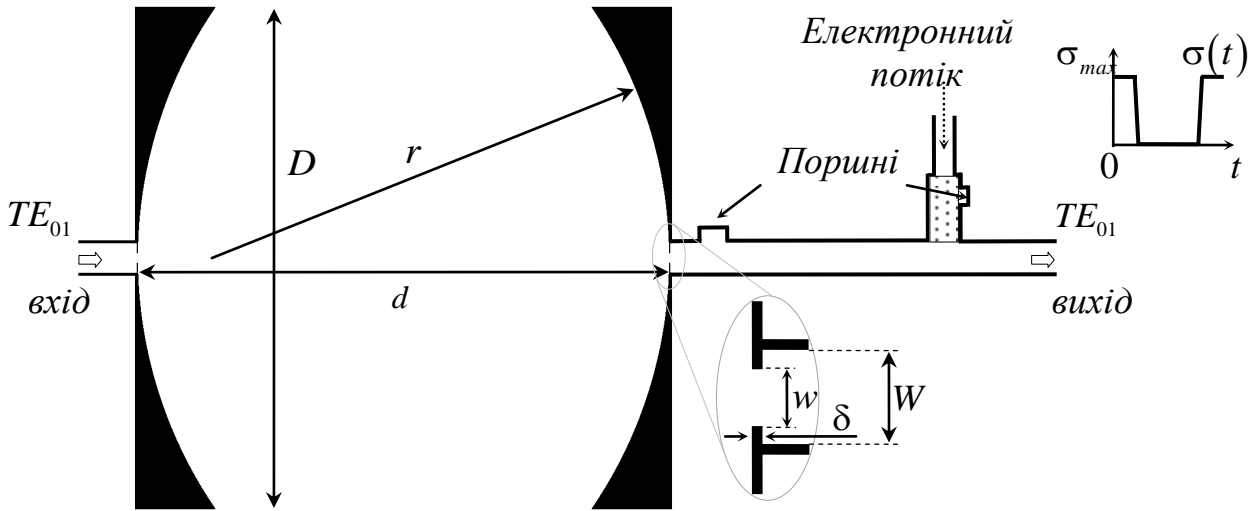


Рисунок 15 – Геометрія двоступеневого компресора

у резонаторі, з якого відбувається перекачка.) В точках спостереження  $g_1$  і  $g_2$ , розташованих в пучностях стоячих хвиль в першому і другому резонаторах, спостерігаються характерні биття у часових залежностях електричної компоненти поля (рис. 16(в) і (г)).

Якщо в момент  $t=760,8\text{м}$ , коли вся енергія перекачана з першого резонатора у другий, перевести активний елемент перемикача у провідний стан, то на виході компресора буде сформовано короткий потужний імпульс (рис. 16(д)). Максимум модуля його обвідної функції  $u_1^{compr}(t)$  дорівнює приблизно 10,5. При використанні у компресорі лише одного хвилевідного ступеня й тих самих параметрах накачки і перемикання активного елементу, вихідний імпульс  $u_1^{compr}(t)$  має максимум 6,9. Таким чином, вигреш в коефіцієнті підсилення  $\tilde{G}$  після додавання в компресор ступеня з дводзеркальним накопичувальним резонатором склав приблизно  $(10,5/6,9)^2 \approx 2,3$  рази. Це порівняно невелике значення (див. [18\*]), але воно, очевидно, може бути збільшено шляхом оптимізації геометричних і електричних параметрів розглянутої конструкції компресора, і, в першу чергу, вибором більш добротного робочого коливання в першому ступені.

Насамкінець, у підрозділах 4.6 та 4.7 обговорюються подальші напрямки досліджень активних компресорів, та формулюються основні результати, що отримані в розділі 4.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу точного моделювання перехідних процесів, що відбуваються при дисперсійному та резонансному стисканні ЕМІ. Це рішення ґрунтується на коректній постановці початково-крайових задач, що описують трансформації імпульсних електромагнітних хвиль у двовимірних об'єктах з довільною геометрією, та їх подальшому розв'язку методом кінцевих різниць. Ці початково-крайові задачі в усіх практично цікавих випадках є відкритими, тобто містять нескінченно

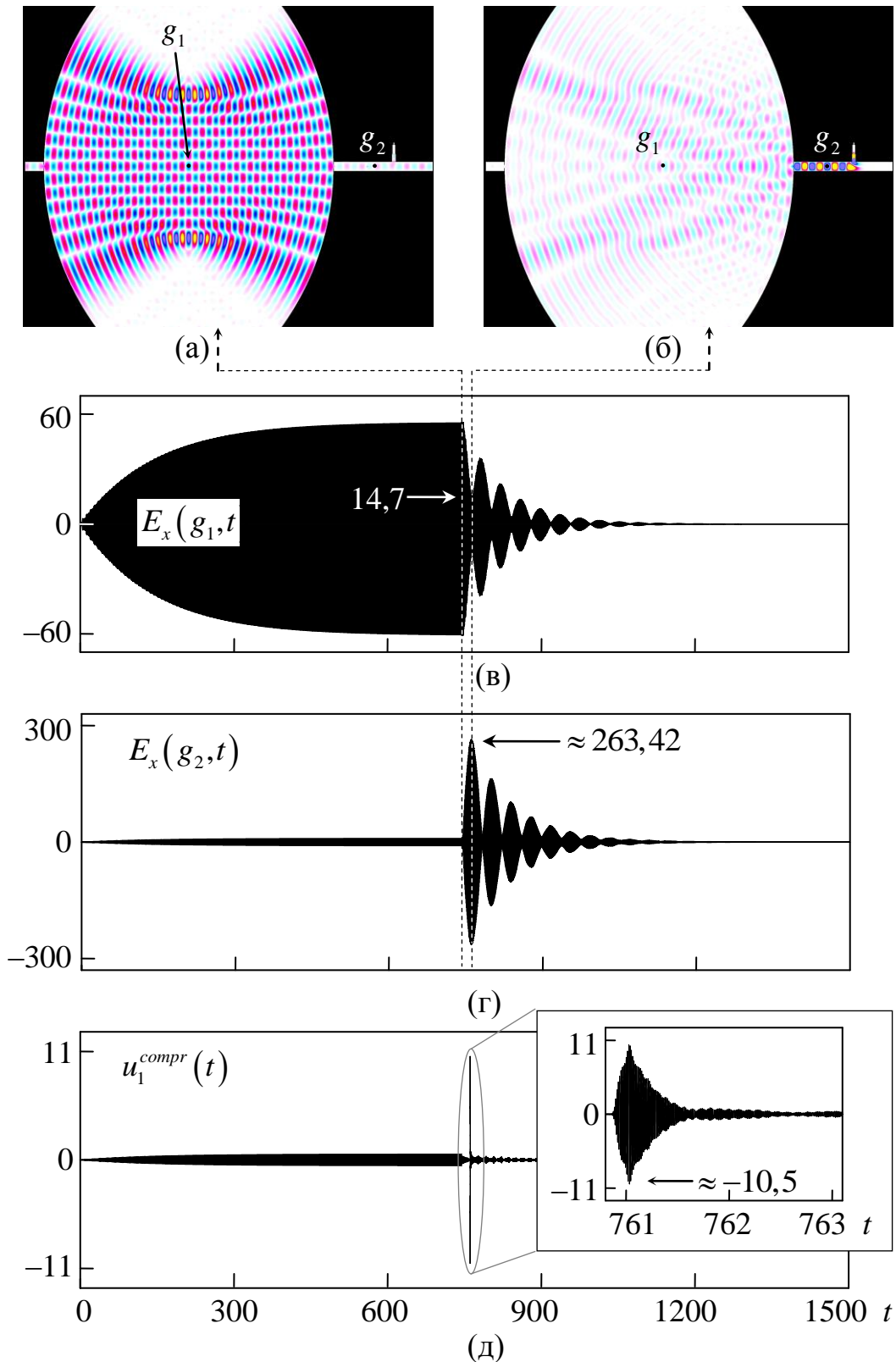


Рисунок 16 – Динамічні характеристики двоступеневого компресора: (а), (б) – розподілення поля  $E_x$  в моменти часу, коли практично вся енергія зосереджена в резонаторах першої та другому ступені; (в), (г) – поле  $E_x(t)$  в точках спостереження  $g_1$  і  $g_2$  в першому і другому резонаторах без скидання енергії у відповідний хвилевід; (д) – часовий профіль стиснутого імпульсу на виході компресора

віддалену точку. Метод ТПУ, який отримав розвиток у цій роботі, дозволив звести такі відкриті задачі до еквівалентних їм закритих (тобто таких, що поставлені у обмеженому об'ємі), що уможливило їх ефективний розв'язок за допомогою персональних комп'ютерів. Чисельні експерименти, що були виконані за такою схемою, дозволили промоделювати й вивчити фізику процесів стискання ЕМІ у різноманітних дисперсійних і резонансних об'єктах, та синтезувати низку прототипів активних і пасивних компресорів.

Для моделювання пасивного стискання ЕМІ було використано метод ОХФ, завдяки якому було точно розраховано часові профілі вхідних сигналів (імпульсів) компресорів за заданим профілем вихідних та геометричними і електричними параметрами дисперсійних елементів. Було отримано важливе узагальнення цього методу, яке дозволило компенсувати втрати хвилі, що стискається у дисперсійному елементі, і отримувати на виході пасивного компресора сигнал заданої форми. Крім цього, таке узагальнення дозволило розраховувати форму вхідних імпульсів навіть у тих випадках, коли вхідний і вихідний сигнали є різними фізичними величинами, наприклад, електричний струм і поле або амплітуда власної хвилі хвилеводу та електричне поле. Також метод ОХФ дозволив довести непридатність кінематичного наближення для визначення законів частотної модуляції імпульсів, що стискаються, та промоделювати стискання надширококутових імпульсів (з шириною частотної смуги до 4-х октав) у різноманітних об'єктах з дисперсією групової швидкості (металеві та діелектричні хвилеводи, оптичні кристали з дисперсією діелектричної проникності та ін.).

Модельний синтез активних компресорів імпульсів було виведено на принципово новий рівень: розроблено нову схему такого синтезу, яка базується на декомпозиції всього пристрою на окремі резонансні елементи, розрахунку їх електродинамічних характеристик, подальшому стикуванні між собою та випробуванні (моделюванні) синтезованого компресора у режимі накопичення енергії та її скидання. За такою схемою синтезовано низку прототипів активних компресорів. Зокрема компресорів на відрізках круглого (з накопиченням енергії у  $TM_{01n}$ - коливанні) та прямокутного (з накопиченням енергії у  $TE_{01n}$ -коливанні) хвилеводів. Для останнього, у випадку, коли інтерференційний ключ виконано у вигляді хвилевідного розширення у  $H$ -площині, а щілина зв'язку з хвилеводом живлення розташована у торцевій стінці, показано, що його накопичувальний резонатор може бути налаштовано як у режим резонансного проходження, так і у режим резонансного відбиття хвилі накачки. За умов резонансного відбиття досягається найвища добротність коливання, що збуджується у резонаторі, і, як наслідок, вихідний імпульс компресора має найвищу амплітуду поля (потужність). Це є вкрай важливим результатом, – такі конструкції накопичувальних резонаторів найпоширеніші серед дослідників, але вони ніколи не налаштовувалися у режим максимальної добротності.

За новою схемою синтезовано прототип двоступеневого компресора з відкритим дводзеркальним резонатором у першому ступені та одним інтерференційним перемикачем у другому хвилевідному ступені. В цій моделі реалізовано ключовий ефект, який забезпечує функціонування двоступеневих

конструкцій – ефект повної перекачки енергії з резонатора першого ступеня у резонатор другого. Це дозволило отримати більш ніж дворазове підвищення імпульсної потужності в порівнянні з компресором, у якому використовується лише один хвилевідний ступінь.

Таким чином, отримані в дисертаційній роботі результати дозволяють виконувати синтез та оптимізацію усіх основних вузлів активних і пасивних компресорів електромагнітних імпульсів ще на етапі їх моделювання. Це дозволяє сподіватися, що розвинений у дисертації математичний апарат прискорить подальший прогрес у цій галузі радіофізики.

## СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1\*. С. В. Самсонов, *Гирорезонансные приборы и СВЧ компрессоры на основе волноводов с винтовой гофрировкой поверхности*, дисс. ... д.ф.-м.н., 01.04.04 – физическая электроника, Нижний Новгород, 2007.
- 2\*. С. А. Ахманов, В. А. Выслоух, А. С. Чиркин, *Оптика фемтосекундных лазерных импульсов*. М.: Наука, 1988.
- 3\*. Н. Д. Девятков, А. Н. Диденко, Л. Я. Замятина, С. В. Разин, Ю. Г. Юшков, “Формирование мощных импульсов при накоплении СВЧ-энергии в резонаторе”, *Радиотехника и Электроника*, № 6, с. 1227–1230, 1980.
- 4\*. Артеменко С. Н., *Динамика импульсной компрессии СВЧ-мощности в многоволновых объемных резонаторах*, дисс. ... д.ф.-м.н., 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, Томск, 1998.
- 5\*. A. Taflove, S.C. Hagness *Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method*. Boston, London: Artech House, 2000.
- 6\*. В. Ф. Кравченко, Ю. К. Сиренко, К. Ю. Сиренко, *Преобразование и излучение электромагнитных волн открытыми резонансными структурами. Моделирование и анализ переходных и установившихся процессов*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011.
- 7\*. Л. Фелсен, Н. Маркувиц, *Излучение и рассеяние волн. Т. 1*. М.: МИР, 1978.
- 8\*. Г. В. Кисунько *Электродинамика полых систем*. Ленинград: Изд-во ВКАС, 1949.
- 9\*. А. А. Kirilenko, V. I. Tkachenko, L. A. Rud', D. Yu. Kulik, *The mode-matching technique and fast numerical models of arbitrary coordinate waveguide objects: Quasi-Optical Control of Intense Microwave Transmission*, Ch.4, Springer, 2005.
- 10\*. Б. Я. Зельдович “Обращение волнового фронта при вынужденном рассеянии света”, *Успехи Физических Наук*, т. 138, вып. 2, с. 249–288, 1982.
- 11\*. В. Л. Братман, Г. Г. Денисов, С. В. Самсонов, А. У. Кросс, К. Рональд, А. Д. Р. Фелпс, “Метод достижения мультигигаваттной пиковой мощности путём компрессии импульсов СВЧ излучения релятивистской лампы обратной волны в винтовом волноводе”, *Изв. ВУЗов. Радиофизика*, т. 50, № 1, с. 40–53, 2007.
- 12\*. Я. Д. Ширман, *Радиоволноводы и объёмные резонаторы*. М.: «Связьиздат», 1959.

- 13\*. А. Г. Кошно, Н. Г. Мендрул, В. И. Правда, А. П. Скляров, “Широкополосный возбудитель желобкового волновода”, *Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника*, т. 30, № 10, с. 92–93, 1987.
- 14\*. В. П. Шестоपालов, *Метод задачи Римана-Гильберта в теории дифракции и распространения электромагнитных волн*. Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1971.
- 15\*. Л. А. Вайнштейн, “Распространение импульсов”, *Успехи Физических Наук*, т. 118, вып. 2, с. 339–367, 1976.
- 16\*. E.D. Palik, Ed., *Handbook of Optical Constants of Solids. Vol. 3*. 1998.
- 17\*. D. L. Birx, D. J Scalapino, “Microwave energy compression using a high-intensity electron beam switch”, *Journal of Applied Physics*, vol. 51, no. 7, pp. 3629–3631, 1980.
- 18\*. Сенюков В. А. *Линейные ускорители электронов с компрессией энергии ВЧ-поля генератора*, дисс. ... д.т.н., 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника, Москва, 1996.

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. В. Л. Пазынин, К. Ю. Сиренко, “Преобразование импульсных  $TE_{0n}$ - и  $TM_{0n}$ -волн аксиально-симметричными волноводными узлами. Щелевые резонансы”, *Электромагнитные волны и электронные системы*, т. 10, № 10, с. 21–26, 2005.
2. И. В. Иванченко, А. М. Королёв, В. Л. Пазынин, Н. А. Попенко, М. М. Хруслов, “Особенности формирования диаграмм направленности монополярной антенны в присутствии конечных экранов”, *Радиофизика и электроника: Сб. трудов ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины*, т. 11, № 1, с. 55–60, 2006.
3. В. Л. Пазынин, В. Е. Филиппенко, “Преобразование поверхностных волн в объёмные в системе «частично экранированный планарный волновод – открытый диэлектрический резонатор»”, *Электромагнитные волны и электронные системы*, т. 13, № 10, с.21–29, 2008.
4. I. K. Kuzmitchev, P. M. Melezhyk, V. L. Pazynin, K. Yu. Sirenko, Yu. K. Sirenko, O. S. Shafalyuk, L. G. Velychko, “Model synthesis of energy compressors”, *Радиофизика и электроника: Сб. трудов ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины*, т. 13, № 2, с.166–172, 2008.
5. В. Ф. Кравченко, В. Л. Пазынин, К. Ю. Сиренко, Ю. К. Сиренко, “Плоские задачи электродинамики несинусоидальных волн для компактных открытых резонаторов с волноводной питающей линией. Решетки как диаграммообразующие структуры”, *Электромагнитные волны и электронные системы*, т. 14, № 6, с. 4–20, 2009.
6. K. Sirenko, V. Pazynin, Y. Sirenko, H. Bagci, “An FFT-accelerated FDTD scheme with exact absorbing conditions for characterizing axially symmetric resonant structures”, *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 111, pp. 331–364, 2011.
7. K. Sirenko, V. Pazynin, Y. Sirenko, H. Bagci, “Compression and radiation of high-power short radio pulses. I. Energy accumulation in direct-flow waveguide



- compressors”, *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 116, pp. 239–270, 2011.
8. K. Sirenko, V. Pazyнин, Y. Sirenko, H. Bagci, “Compression and radiation of high-power short radio pulses. II. A novel antenna array design with combined compressor/radiator elements”, *Progress in Electromagnetics Research*, vol.116. pp. 271–296, 2011.
  9. В. Л. Пазынин, “О возможности строгого моделирования компрессии частотно-модулированных импульсов в полых регулярных волноводах”, *Радиофизика и Электроника*, т. 3, № 3, с. 30–34, 2012.
  10. V. L. Pazyнин, “Compression of frequency-modulated electromagnetic pulses in sections of regular waveguides” *Telecommunication and Radio Engineering*, vol. 71, no. 20, pp. 1833–1857, 2012.
  11. M. B. Orazbekova, V. L. Pazyнин, S. S. Sautbekov, K. Y. Sirenko, Yu. K. Sirenko, A. A. Vertiy, “The exact absorbing conditions method in the analysis of open electrodynamic structures. Axially-symmetrical objects in free space and effective calculations”, *Физические Основы Приборостроения*, т. 3, № 4. с. 40–58, 2014.
  12. В. Л. Пазынин, “Свойства мультиплета в спектре колебаний цепочки связанных волноводных резонаторов”, *Радиофизика и Электроника*, т. 8(22), № 1, с. 3–14, 2017.
  13. В. Л. Пазынин, “Эффект запираения изгиба волновода вблизи критической частоты второй моды”, *Радиофизика и Электроника*, т. 22, № 2, с. 3–10, 2017.
  14. В. Л. Пазынин, К. Ю. Сиренко, Ю. К. Сиренко, Н. П. Яшина, “Точные поглощающие условия в начально-краевых задачах вычислительной электродинамики. Обзор”, *Физические Основы Приборостроения*, т. 6, № 4(26), с. 2–33, 2017.
  15. V. L. Pazyнин, M. V. Maiboroda, “Electromagnetic pulse compression in sections of helically coiled waveguides”, *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 76, no. 3, pp.209–225, 2017.
  16. V. L. Pazyнин, M. V. Maiboroda, “Compression of electromagnetic pulses with piecewise linear laws of amplitude and frequency modulation”, *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 76, no. 4, pp. 277–284, 2017.
  17. V. L. Pazyнин, “Simulation of the characteristics of an active microwave power compressor”, *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 76, no. 12, pp. 1033–1047, 2017.
  18. V. L. Pazyнин, M. V. Maiboroda, “Compression of electromagnetic pulses in dielectric waveguides of a finite length”, *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 76, no. 14, pp. 1219–1230, 2017.
  19. V. L. Pazyнин, M. V. Maiboroda, “Modeling of the compression of wave packets induced by a current filament in a plane-parallel waveguide”, *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 76, no. 16, pp. 1391–1404, 2017.
  20. V. L. Pazyнин, “Microwave pulse radiator with passive compression of input signal”, *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 77, no. 1, pp. 13–25, 2018.
  21. V. L. Pazyнин, V. Z. Mazur, A. O. Boguslavskaya, “On the feasibility of using a groove waveguide as a dispersive element in a passive microwave power

- compressor”, *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 77, no. 5, pp. 373–381, 2018.
22. V. L. Pazynin, S. S. Sautbekov, K. Yu. Sirenko, Yu. K. Sirenko, A. A. Vertiy, N. P. Yashina, “Comparison of exact and approximate absorbing conditions for initial boundary value problems of the electromagnetic theory of gratings”, *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 77, no. 18, pp. 1581–1595, 2018.
  23. В. Л. Пазынин, “Строгая электродинамическая модель накопительного резонатора активного компрессора СВЧ мощности”, *Физические Основы Приборостроения*, т. 7, № 3(29), с. 86–106, 2018.
  24. V. Pazynin, K. Sirenko, Y. Sirenko *High-Power Short Pulses Compression: Analysis and Modeling* Ch. 6 in book *Electromagnetic waves in complex systems. Selected theoretical and applied problems*, Springer, 2016. – P.327–385.
  25. Y. K. Sirenko, V. L. Pazynin, A. I. Vyazmitinova, K. Y. Sirenko, “Exact ‘absorbing’ conditions in initial boundary-value problems of the theory of pulse wave radiation”, *Proc. of the 4-th International Conference on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol, Ukraine*, pp. 110–112, 2003.
  26. Y. K. Sirenko, V. L. Pazynin, V. F. Naumenko, L. G. Velychko, A. I. Vyazmitinova, “The package of programs for solving model initial boundary-value problems in the theory of nonsinusoidal electromagnetic waves”, *Proc. of the 2-nd International Workshop “Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals”, Sevastopol, Ukraine*, pp. 91–93, 2004.
  27. Yu. K. Sirenko, V. L. Pazynin, O. S. Shafalyuk, “Forming and radiation of high-power short radio pulses”, *Proc. of the 6-th International Conference on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol, Ukraine*, pp. 107–109, 2007.
  28. R. Chernobrovkin, I. Ivanchenko, A. Korolev, L. P. Ligthart, N. Popenko, V. Pazynin, “Wide-band antenna array”, *Proc. of the 38-th European Microwave Conference, Amsterdam, the Netherlands*, pp. 1628–1631, 2008.
  29. K. Sirenko, V. Pazynin, “Analysis and model synthesis of resonant units for radiators of high-power short radio pulses” *Proc. of the URSI International Symposium on Electromagnetic Theory, Berlin, Germany*, pp. 522–524, 2010.
  30. A. I. Amosova, A. A. Krivchikova, V. L. Pazynin, Y. K. Sirenko, “The formation and radiation of high-power short radio pulses: new approaches to modelling and analysis of microwave compressors”, *Proc. of the 5-th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, Sevastopol, Ukraine*, pp. 16–21, 2010.
  31. K. Sirenko, V. Pazynin, H. Bagci, “Compression of beamed short pulses radiated by a phased array”, *Proc. of the USNC-URSI National Radio Science Meeting, Spokane, USA*, pp. 1, 2011.
  32. S. Sautbekov, K. Sirenko, Yu. Sirenko, V. Pazynin, A. Vertiy, “The exact absorbing conditions method in the analysis of open electrodynamic structures. The expansion on axially-symmetrical objects in free space and effective calculations”, *Proc. of the 7-th International Conference “Acoustooptic and radar methods for information measurements and processing”, Moscow-Suzdal, Russia*, pp. 90–92, 2014.
  33. M. V. Maiboroda, V. L. Pazynin, H. O. Sliusarenko, “Electromagnetic Pulses Compression in Helically Coiled Dielectric Waveguide”, *Proc. of the 22-nd*

- International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, Lviv-Dnipro, Ukraine*, pp. 104–107, 2017.
34. M. V. Maiboroda, V. L. Pazynin, H. O. Sliusarenko, “Passive Compression of Optical Pulses in Uniform Isotropic and Dispersive Medium”, *Proc. of the IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, Lviv, Ukraine*, pp. 228–230, 2017.
35. V. Pazynin, K. Sirenko, Y. Sirenko, N. Yashina, “Comparative analysis of various domain truncation techniques for initial-boundary value problems for periodic structures”, *The Progress in electromagnetics research symposium abstracts, Toyama, Japan*, pp. 1, 2018.

## АНОТАЦІЯ

**Пазинін В. Л. Моделювання і аналіз процесів пасивної та активної компресії електромагнітних імпульсів мікрохвильового і оптичного діапазонів.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-прикладної проблеми строгого моделювання, аналізу та синтезу основних елементів пасивних і активних компресорів електромагнітних імпульсів (ЕМІ). Розглядається два види компресії: пасивна (або дисперсійна) та активна (резонансна). В основі першої з них лежить явище деформації форми та тривалості імпульсу, що поширюється в середовищі або хвилевідному тракті з дисперсією групової швидкості. В основі другої – процес накопичення енергії зовнішнього квазімонохроматичного джерела в резонансному об’ємі і подальше її скидання у відвідний хвилевід або у вільний простір шляхом швидкої (за час значно менший часу накопичення) зміни спектральних характеристик резонатора-накопичувача.

При дослідженні процесів пасивного стискання ЕМІ було використано метод обернення хвильового фронту. Цей метод дозволив уперше строго промоделювати стискання амплітудно- та частотно-модульованих імпульсів в металевих і діелектричних хвилеводах, оптично прозорих (необмежених) середовищах, дисперсійних системах, що випромінюють. За його допомогою було точно визначено часовий профіль вхідних імпульсів за параметрами вихідних (стиснутих) імпульсів та за заданими параметрами дисперсійного тракту, який може мати дифракційні, радіаційні та омичні втрати, а також опір випромінювання. Було встановлено непридатність відомого «кінематичного наближення», заснованого на поданні широкосмугового імпульсу у вигляді суперпозиції хвильових пакетів, кожен з яких рухається зі своєю швидкістю, для точного визначення параметрів імпульсу, що стискається. Продемонстровано принципову можливість компресії оптичних та інфрачервоних імпульсів з шириною спектра до 4-х октав і вище в середовищах з дисперсією діелектричної проникності.

Для моделювання та аналізу процесів активної компресії ЕМІ розвинено і узагальнено метод точних поглинаючих умов, в основі якого лежить побудова і використання граничних умов, що дозволяють зводити відкриті початково-крайові задачі електродинаміки до еквівалентних закритих задач, які допускають реалізацію ефективних і універсальних обчислювальних схем методу кінцевих різниць у часовій області. Запропоновано і реалізовано схему модельного синтезу активних компресорів мікрохвильових імпульсів з характеристиками, які були недосяжними в рамках підходів, що використовувалися раніше. За такою схемою синтезовано низку прототипів накопичувальних систем одно- та двоступеневого компресорів. Промодельовано та детально вивчено перехідні процеси, що протікають під час перемикавання активного елемента перемикача в запереному  $H$ -площинному розширенні хвилеводу, і показано, що існує два механізми переходу такого ключа із замкнутого стану у відкритий. Один з них пов'язаний з дисипацією енергії, що запасена в запереному коливанні, в активній області при збільшенні її питомої провідності, інший – зі зміщенням резонансної частоти запереного розширення.

Розвинута в дисертаційній роботі методологія моделювання та аналізу перехідних процесів може бути без істотних змін використана при вирішенні актуальних теоретичних й прикладних задач як активної, так і пасивної компресії ЕМІ в довільних хвилевідних вузлах.

**Ключові слова:** початково-крайова задача, метод точних поглинаючих умов, метод скінченних різниць, метод обернення хвильового фронту, компресія електромагнітних імпульсів, дисперсія групової швидкості електромагнітних хвиль.

## АННОТАЦИЯ

**Пазынин В. Л. Моделирование и анализ процессов пассивной и активной компрессии электромагнитных импульсов микроволнового и оптического диапазонов.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиопизика. – Институт радиопизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 2019.

Диссертационная работа посвящена решению важной научно-прикладной проблемы строгого моделирования, анализа и синтеза основных элементов пассивных і активных компрессоров электромагнитных импульсов (ЭМИ). Рассматривается два вида компрессии: пассивная (дисперсионная) и активная (резонансная). В основе первой из них лежит явление деформации формы и длительности импульса, который распространяется в среде или волноводном тракте с дисперсией групповой скорости. В основе другой – процесс накопления энергии внешнего квазимонохроматического источника в резонансном объеме и дальнейший ее сброс в отводящий волновод или свободное пространство путем быстрого (за время значительно меньше времени накопления) изменения спектральных характеристик резонатора-накопителя.

При исследовании процессов пассивного сжатия ЭМИ использован метод обращения волнового фронта. Этот метод позволил впервые строго

про моделировать сжатие амплитудно- и частотно-модулированных импульсов в металлических и диэлектрических волноводах, оптически прозрачных (неограниченных) средах, дисперсионных излучающих системах. С его помощью точно определен временной профиль входных импульсов по параметрам выходных (сжатых) импульсов и по заданным параметрам дисперсионного тракта, который может иметь дифракционные, радиационные и омические потери, а также сопротивление излучения. Установлена непригодность известного «кинематического приближения», основанного на представлении широкополосного импульса в виде суперпозиции волновых пакетов, каждый из которых движется со своей скоростью, для точного определения параметров сжимаемого импульса. Продемонстрировано принципиальную возможность компрессии оптических и инфракрасных импульсов с шириной спектра до 4-х октав и выше в средах с дисперсией диэлектрической проницаемости.

Для моделирования и анализа процессов активной компрессии ЭМИ был развит и обобщен метод точных поглощающих условий, в основе которого лежит построение и использование граничных условий, которые позволяют сводить открытые начально-краевые задачи электродинамики к эквивалентным им закрытым, которые допускают реализацию эффективных и универсальных вычислительных схем метода конечных разностей во временной области. Предложена и реализована схема модельного синтеза активных компрессоров микроволновых импульсов с характеристиками, недостижимыми в рамках использовавшихся ранее подходов. С помощью такой схемы синтезирован ряд прототипов накопительных систем одно- и двухступенчатого компрессоров. Промоделированы и детально изучены переходные процессы, которые протекают во время переключения активного элемента переключателя в запирающем  $H$ -плоскостном расширении волновода, и показано, что существует два механизма перехода такого ключа из запертого состояния в открытое. Один из них связан с диссипацией энергии в активной области при увеличении ее удельной проводимости, другой – со смещением резонансной частоты запирающего расширения.

Развитая в диссертационной работе методология моделирования и анализа переходных процессов может быть без существенных изменений использована при решении актуальных теоретических и прикладных задач как активной, так и пассивной компрессии ЭМИ в произвольных волноводных узлах.

**Ключевые слова:** начально-краевая задача, метод точных поглощающих условий, метод конечных разностей, метод обращения волнового фронта, компрессия электромагнитных импульсов, дисперсия групповой скорости электромагнитных волн.

## ABSTRACT

Pazynin V. L. Modeling and analysis of processes of passive and active compression of electromagnetic pulses of microwave and optical bands. – As a manuscript.

Thesis for scientific degree of doctor of science in physics and mathematics on speciality 01.04.03 – radiophysics. – O. Ya. Usikov institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The thesis is devoted to solving an important scientific and applied problem of rigorous modeling, analysis and synthesis of the main elements of passive and active compressors of electromagnetic pulses (EMP). Two types of compression are considered: passive (dispersive) and active (resonant) ones. The first one is based on the phenomenon of shape deformation and duration of a pulse propagating in a medium or in a waveguide circuit with group velocity dispersion. The process of energy accumulation of an external quasi-monochromatic source in a resonant volume and its next drop into a deflection waveguide or a free space by rapid (within time less than the time of accumulation) changes of the spectral characteristics of the resonator-accumulator is on the basis of the second kind.

When studying the processes of passive compression of EMP, the time reversal (TR) method was used. Within this method, the simulation of compression of amplitude- and frequency-modulated pulses in metal and dielectric waveguides, optically transparent (unlimited) media, and in dispersive radiating systems is performed. It was used to define a time profile of the input pulses by the parameters of the output (compressed) pulses and by the specified parameters of the dispersion path which may possess diffraction, radiation and ohmic losses, as well as the radiation resistance. The unsuitability of the well-known “kinematic approximation” based on the representation of a broadband pulse in the form of a superposition of wave packages each of which moves with its own speed has been established for accurate determination of the parameters of the signal under compression. The possibility in principle of the compression of optical and infrared pulses with a spectrum width of up to 4 octaves and above in media with dispersion of dielectric constant is demonstrated.

To simulate and analyze the processes of active compression of EMP, the method of exact absorbing conditions is developed and generalized which is based on the construction and usage of boundary conditions that allow one to reduce open initial-boundary value problems of computational electrodynamics to the equivalent closed ones permitting the efficient and universal computational schemes implementation of finite-difference method in the time domain. The scheme of model synthesis of active microwave compressors with characteristics unattainable under previous approaches are proposed and implemented. The prototypes of accumulative systems of single-stage and two-stage compressors have been synthesized using this scheme. The transient processes occurring when switching the active element in the locking  $H$ -plane expansion of the waveguide are modeled and studied in detail, it is shown as well that there are two mechanisms for the transition of such a switch from a locked to an open state. One of them is associated with the dissipation of energy stored in the locking oscillation in the active region when increasing its conductivity, the other one – with the shift of the resonant frequency of the locking expansion.

The methodology of modeling and analysis of transients, developed in the dissertation, can be used without any significant changes in solving actual theoretical and applied problems of both active and passive compression of EMR in arbitrary waveguide nodes.

**Keywords:** initial-boundary value problem, the method of the exact absorbing conditions, the finite-difference method, the wave-front reversal method, compression of electromagnetic pulses, group velocity dispersion of electromagnetic waves.