

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

**МАЙБОРОДА МАКСИМ ВІТАЛІЙОВИЧ**



УДК 537.86: 517.958

**АНАЛІЗ І СИНТЕЗ ХВИЛЕВІДНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДИСПЕРСІЙНИХ  
КОМПРЕСОРІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ІМПУЛЬСІВ**

01.04.03 – радіофізика

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

Дисертація на правах рукопису

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

**Науковий керівник** доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Пазинін Вадим Леонідович**,  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова  
НАН України (м. Харків),  
завідувач лабораторії математичної фізики  
відділу статистичної радіофізики

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Вертій Олексій Олексійович**,  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки, (м. Харків),  
професор кафедри фізичних основ електронної техніки

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** 25 березня 2021 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 23 лютого 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

І.В. Іванченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Техніка, що базується на роботі з електромагнітними імпульсами (ЕМІ), стає все більш запитаною у сучасній радіо- та оптоелектроніці, в електроніці великих потужностей, в системах радіо- та геолокації, в системах зв'язку у сильно поглинаючих середовищах, тощо. Ця техніка дає нові можливості для вирішення багатьох фундаментальних та прикладних проблем, але потребує для забезпечення ефективної і результативної роботи нових знань щодо генерації, поширення та просторово-часових трансформацій ЕМІ. У багатьох випадках актуальною та дуже непростою для вирішення проблемою є формування та випромінювання потужних коротких імпульсів, що охоплюють заданий спектральний діапазон.

Одним із можливих засобів отримання таких ЕМІ з унікальними параметрами є компресія, зокрема, компресія дисперсійна або пасивна компресія. Вона полягає у використанні ефекту деформації ЕМІ під час їх поширення у середовищах або хвилеводах з дисперсією групової швидкості. Якщо параметри відповідної траси та параметри ЕМІ, що подаються на її вхід, узгоджено між собою, то на виході можна отримати ЕМІ меншої тривалості та більшої потужності. Ефект давно відомий і вже давно реалізується у імпульсній техніці різноманітного призначення. Але, як показує практика, подальший ефективний та збалансований за витратами розвиток такої техніки можливий лише за умови використання на перших кроках її проектування сучасної методології отримання нових знань – методології, що базується на побудові адекватних і строгих моделей досліджуваних процесів, на надійній (за результатами) реалізації цих моделей при чисельному розв'язку відповідних задач аналізу та синтезу. У першу чергу це стосується конструювання компресорів ЕМІ з шириною частотної смуги більшою, ніж октава. Внаслідок довготривалого поширення відповідних ЕМІ вздовж дисперсійної траси, навіть невеликі похибки, що зроблено на етапі моделювання досліджуваних процесів, або на етапі чисельної реалізації відповідних моделей, призводять до непропорційно більш суттєвого погіршення головних характеристик створюваних пристроїв.

Вважаючи на вищесказане, можна прийти до висновку, що тема дисертації, яка присвячена розробці, розвитку та практичній реалізації строгих математичних методів моделювання пасивної компресії ЕМІ, є *актуальною*. Це підтверджується також змістом і результатами розв'язку низки конкретних модельних задач, що були розглянуті, та зробленими за результатами такого розв'язку висновками, важливими як для теорії, так і для практики.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація узагальнює результати досліджень, що були виконані автором у лабораторії математичної фізики відділу статистичної радіофізики Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України в рамках таких держбюджетних тем: *«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, квазіоптики, мікрохвильової електроніки та нових радіофізичних технологій у біології та медицині» (шифр «БУКСИР 5», номер держреєстрації 0117U004033).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є строгий електродинамічний аналіз перехідних процесів, що пов'язані зі стисненням електромагнітних імпульсів дисперсійними хвилевідними елементами, та модельний синтез нових прототипів таких елементів із цікавими для застосування характеристиками.

Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні ключові задачі:

- 1) виконано строгую постановку та алгоритмізацію початково-крайових задач, що описують просторово-часові трансформації електромагнітних хвиль у відкритих двовимірних областях аналізу та дозволяють проводити весь комплекс досліджень, запланованих у дисертаційній роботі;
- 2) створено та надійно апробовано пакет програм, що реалізують розв'язання широкого кола початково-крайових задач, пов'язаних з аналізом і синтезом дисперсійних компресорів, та дозволяють отримувати всі потрібні для подальшого розгляду електродинамічні характеристики у зручному для користувача форматі;
- 3) проведено проблемно-орієнтовані обчислювальні експерименти, їх результати опрацьовано, зроблено обґрунтовані висновки щодо найважливіших питань, поставлених у дисертаційній роботі.

*Об'єкт дослідження* – перехідні процеси при поширенні електромагнітних хвиль у середовищах і хвилеводах із дисперсією групової швидкості.

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

**Методи дослідження.** Всі результати дисертаційної роботи отримано в рамках сучасної методології, що базується на математичному моделюванні та обчислювальних експериментах. При реалізації цієї методології було використано наступні строгі числові та аналітичні методи: метод неповного розподілу змінних, метод інтегральних перетворень, метод точних поглинаючих умов, метод кінцевих різниць в часовій області, метод обернення хвильового фронту.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що для вирішення ключових задач дисертації (моделювання, аналіз і синтез хвилевідних елементів дисперсійних компресорів) було запропоновано та досить акуратно (зі всіма необхідними перевірками) реалізовано два відносно нових підходи. Вони базуються на раніш розвинутих (у тому числі і за участю автора роботи) методах точних поглинаючих умов і обернення хвильового фронту (ОХФ), та дозволяють розглядати двовимірні початково-крайові задачі для  $E$ -поляризованих хвиль, що поширюються у «відкритих» областях декартового простору  $R^2$  та у вигнутих у  $H$ -площині відрізках плоско-паралельних металевих і планарних діелектричних

хвилеводів. Це дозволило, зокрема, переконливо довести можливість ефективної компресії електромагнітних імпульсів із шириною частотної смуги в декілька октав звернутими в спіраль хвилеводами, і, таким чином, дати досить обґрунтовані рекомендації щодо зменшення габаритів дисперсійних компресорів.

Серед інших нових результатів дисертації слід відзначити наступне.

- 1) Доведено, що лінійна апроксимація законів модуляції вхідних сигналів по амплітуді та частоті не призводить до радикальної зміни форми стиснутого імпульсу на виході.
- 2) Вперше строго розглянуто стиснення імпульсу, що наводиться ниткою зі струмом, в кільцеподібному хвилеводі. Отримано закони модуляції стороннього струму, для якого дві імпульсні хвилі, що симетрично відходять від нитки зі струмом, приходять до протилежної точки хвилеводу з заданим часовим профілем та інтерферують між собою, що приводить до додаткового подвоєння електричного поля в цій точці.
- 3) За допомогою методу обернення хвильового фронту розв'язано задачу стиснення надширококутового (з шириною спектральної смуги в одну октаву) ЕМІ у планарному діелектричному хвилеводі, що був звернутий у досить густу спіраль.
- 4) Вигнутий в спіраль діелектричний хвилевід використано в синтезованому прототипі імпульсної антени, яка спочатку стискає ЕМІ, а потім вже його випромінює. Для такої антени методом ОХФ знайдено точний часовий профіль збуджуючого стороннього струму по заданому профілю ЕМІ, що випромінюється. Отримано коефіцієнт стиснення, що дорівнює 8,6 при тривалості стиснутого імпульсу в 2 нс і ширині спектральної смуги приблизно в дві октави (діапазон  $1,4 \div 5,7$  ГГц).
- 5) Отримано 7-кратне стиснення *E*-поляризованого імпульсу в спектральній смузі  $7,2 \div 31$  ГГц і 16-кратне стиснення *H*-поляризованого імпульсу у смузі  $21,5 \div 35,8$  ГГц у несиметричному діелектричному хвилеводі довжиною 1 м, який розміщено на металевій підкладці.
- 6) Вперше строго проаналізовано стиснення оптичних і інфрачервоних ЕМІ в безмежному об'ємі, який заповнено полістиролом або кварцовим склом. Показано можливість стиснення ЕМІ в таких оптичних матеріалах з шириною спектральної смуги до 2-х октав і збільшення пікової потужності ЕМІ до 20 дБ на одному метрі оптичного шляху.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в розроблених і реалізованих програмно підходах, які дозволяють удосконалити та покращити характеристики електродинамічних дисперсійних компресорів, досягнутих на сьогодні.

В дисертаційній роботі розглянуто низку нових моделей дисперсійних стискаючих пристроїв, кожен з яких має певний набір унікальних характеристик (робочий діапазон, ширина спектральної смуги, коефіцієнт компресії, масогабаритні параметри, тощо) і може слугувати прототипом при створенні компресорів і компресорів-випромінювачів ЕМІ різного призначення. Використання відповідних результатів роботи у різноманітних радіофізичних застосуваннях (радіолокація, системи передачі даних, прискорювачі заряджених частинок) може привести до

суттєвого розширення можливостей техніки, що тут працює. Важливо також і те, що розвинений в дисертації строгий підхід до математичного моделювання перехідних хвильових процесів у досить складних електродинамічних структурах дозволяє проводити подальшу оптимізацію вже відомих і синтез принципово нових пристроїв геолокації, медичної техніки та електромагнітної безпеки, розробляти нові системи зв'язку у сильно поглинаючому середовищі та системи, що забезпечують охорону територій від несанкціонованого проникнення безпілотних апаратів.

**Особистий внесок здобувача.** У дисертації узагальнено результати досліджень, що опубліковані в наукових статтях [1–7] і тезах конференцій [8, 9]. Особистий внесок здобувача в згаданих роботах полягав в участі у побудові й алгоритмізації електродинамічних моделей, у написанні комп'ютерних програм та їх тестуванні, у проведенні обчислювальних експериментів, а також в участі в обробці і аналізі отриманих результатів і формулюванні узагальнюючих висновків. Зокрема, особисто здобувачем було виконано дискретизацію початково-крайових задач у областях, що обмежені стінками вигнутих хвилеводів (підрозділ 2.2), програмну реалізацію отриманих розрахункових формул і обчислювальних процедур, що дозволяють розраховувати часові профілі ЕМІ в середовищах з дисперсією діелектричної проникності (підрозділ 4.4). Особисто здобувачем в повному обсязі виконано чисельні експерименти, в яких моделювалось стиснення ЕМІ у вигнутих порожнистих [1, 2, 4] і діелектричних [7, 8] хвилеводах, в дисперсійних середовищах [5, 9] та у прямолінійних відрізках діелектричних хвилеводів [3, 6].

Частково матеріали публікацій [1–6, 8, 9] було використано у дисертації наукового керівника здобувача [1\*]:

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали, які представлено 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:

- 1) 22-nd International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (Lviv-Dnipro, Ukraine, 2017);
- 2) IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (Lviv, Ukraine, 2017);

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 9 наукових працях [1–9]: у 7 статтях у профільних наукових журналах [1–7], і в 2-х тезах доповідей на міжнародних конференціях [8, 9].

**Структура та 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 130 сторінок. Вона містить 51 рисунки (з них 4 розміщені на 3 окремих сторінках), 1 таблицю та 123 бібліографічних посилань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, основні задачі, об'єкт та предмет дослідження, наведено 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 виконано огляд літератури, що присвячена дисперсійному стисканню ЕМІ, проаналізовано сучасний стан розвитку цієї проблематики, зроблено висновок щодо можливості суттєвого покращення основних характеристик пасивних компресорів ЕМІ. Насамперед це стосується коефіцієнта збільшення імпульсної потужності  $G$ , який у сучасних лабораторних зразках компресорів не перевищує 15 дБ. З іншого боку, теоретично цей коефіцієнт може бути як завгодно великим (у рамках лінійного наближення), – достатньо лише необмежено збільшувати час взаємодії ЕМІ з дисперсійним елементом. Для подолання цього протиріччя необхідно застосовувати виключно строгі підходи до проектування компресорів ЕМІ та розрахунку їх електродинамічних характеристик. Тому в дисертації (як і в [1\*]) зроблено вибір на користь кінцево-різницевого методу у часовій області для дискретизації модельних початково-крайових задач з точними поглинаючими умовами та на користь методу обернення хвильового фронту [2\*,3\*] для синтезу та моделювання роботи дисперсійних компресорів ЕМІ. Суть методу ОХФ, як це випливає з назви, полягає в оберненні в часі динамічної картини електромагнітного поля, або, іншими словами, у заміні у рівняннях, що описують трансформацію ЕМІ, часу  $t$  на  $-t$ . Власне сам метод включає в себе наступні ключові кроки:

- 1) вибір форми імпульсу, який необхідно отримати в результаті компресії;
- 2) моделювання проходження імпульсу вздовж дисперсійної траси;
- 3) обернення в часі імпульсу, що отримано на попередньому кроці, та, за необхідності, помноження його спектральних компонент на множник, що компенсує енергетичні втрати ЕМІ на всій довжині траси;
- 4) моделювання проходження сформованого імпульсу через дисперсійний елемент.

У розділі 2 виконано постановку й алгоритмізацію модельних початково-крайових задач, числовий розв'язок яких привів до результатів, що представлені у дисертації. Розглянуто два типи таких задач: двовимірні ( $\partial/\partial x=0$ ) задачі в декартовій системі координат для  $E$ - та  $H$ -поляризованих хвиль, що виникають при збудженні хвилевідного вузла відносно довільної форми [3\*], та двовимірні задачі для  $E$ -поляризованих хвиль, що поширюються у вигнутих в  $H$ -площині відрізках плоскопаралельних хвилеводів [4\*].

Геометрію задач першого типу показано на рис. 1. Тут  $L_j$ ,  $j=1,2,\dots,M$  – віртуальні границі у перерізах функціонально напівнескінчених плоскопаралельних хвилеводів;  $L$  – прямокутна віртуальна границя у вільному просторі;  $M$  і  $B$  – проекції металевих елементів і поверхонь діелектричних елементів на площину  $uOz$ ;  $Q_L$  – область аналізу, що обмежена границями  $L_j$ ,  $L$  та  $M$ ;  $Q_j$  – область, яка зайнята сторонніми струмами;  $U$  –  $TE_0$ - у випадку  $E$ -

поляризації поля, або  $TM_0$ - у випадку  $H$ -поляризації поля хвилі, що формуються вузлом. На границі  $L_1$   $U = U^{out} + U^{inc}$ , де  $U^{inc}$  – падаюча  $TE_{0p}$ -, або  $TM_{0p}$ - хвилі.

Хвилевідний вузол створено за допомогою кінцевого числа віртуальних напівнескінчених хвилеводів (портів), що спрямовані вздовж координатних осей  $y$  або  $z$ . Геометрія діелектричних і металевих розсіювачів може бути довільною.  $E$ -поляризовані поля ( $TE_0$ -хвилі) у такому вузлі описуються наступною початково-крайовою задачею[3\*]

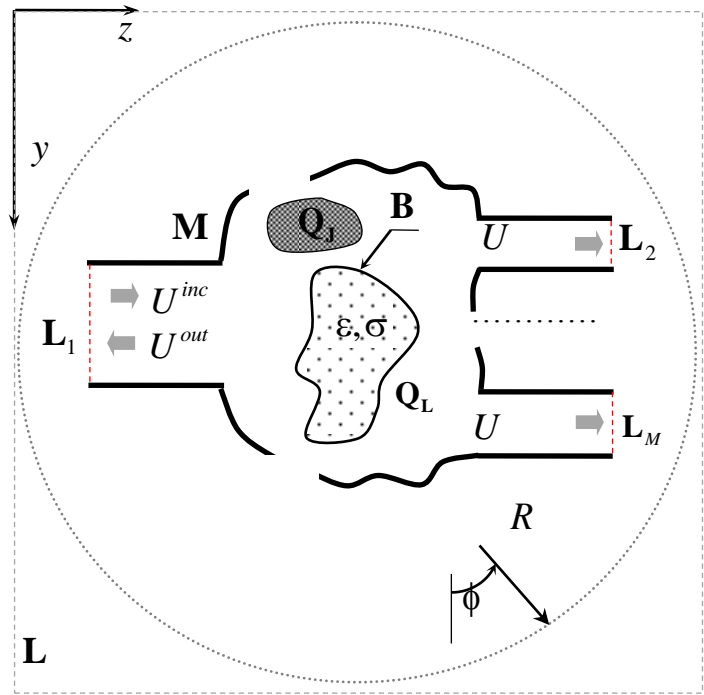


Рисунок 1 – Загальний вигляд геометрії двовимірних модельних задач у декартовій системі координат

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\eta_0} \cdot \frac{\partial(\varepsilon E_x)}{\partial t} = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x - J_x, \quad \eta_0 \frac{\partial(\mu H_y)}{\partial t} = -\frac{\partial E_x}{\partial z}, \\ \eta_0 \frac{\partial(\mu H_z)}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial y}; \quad \{y, z\} \in Q_L, \quad t > 0 \\ E_x|_{t=0} = 0, \quad \vec{H}|_{t=0} = 0 \\ E_x \text{ та } \vec{H}_{tg} \text{ безперервні на поверхнях розриву функцій } \varepsilon \text{ та } \sigma, \\ E_x = 0 \text{ на границях } M \text{ та на зовнішніх (відповідно вузла) границях } L_j, \\ \mathbf{A}_L [E_x] \Big|_{y,z \in L} = 0, \quad \mathbf{A}_{L_j} [E_x] \Big|_{y,z \in L_j; j \neq 1} = 0, \quad \mathbf{A}_{L_1} [E_x - E_{x,p}^{inc}] \Big|_{y,z \in L_1} = 0; \quad t \geq 0. \end{array} \right. \quad (1)$$

Тут  $E_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$  – ненульові декартові компоненти векторів напруженості електричного ( $\vec{E}(y, z, t)$ ) та магнітного ( $\vec{H}(y, z, t)$ ) полів;  $J_x$  – ненульова компонента вектора густини стороннього електричного струму;  $\sigma$  – питома електрична провідність середовища;  $\varepsilon$  і  $\mu$  – відносні діелектрична та магнітна проникності середовища;  $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$  – імпеданс вільного простору;  $\varepsilon_0$  і  $\mu_0$  – електрична та магнітна сталі вакууму. Тут і надалі всі фізичні величини, за виключенням змінної часу  $t$ , мають розмірності, визначені системою СІ. Змінна  $t$  – це добуток фізичного часу на швидкість світла в вакуумі, що має розмірність в метрах.



Інтегро-диференціальні оператори  $\mathbf{A}_L[\dots]$  та  $\mathbf{A}_{L_j}[\dots]$  задають точні поглинаючі умови (ТПУ) на віртуальних границях області аналізу  $\mathbf{Q}_L$ . Вони коректно обмежують розрахунковий простір оригінальної початково-крайової задачі, не спотворюючи при цьому фізики досліджуваних процесів, та відкривають шлях для її числового розв'язку стандартними методами кінцевих різниць [4\*]. Аналітичну форму операторів  $\mathbf{A}_{L_j}[\dots]$  детально описано у роботі [3\*]. Для оператора  $\mathbf{A}_L[\dots]$  використано модифіковану, оригінальну аналітичну форму, що значно спрощує розрахунковий алгоритм і гарантує його стійкість. Цю форму, у розробці та апробації якої брав участь і здобувач, вперше було представлено у дисертації його наукового керівника [1\*].

*Геометрію задач другого типу* ( $E$ -поляризація поля) утворено послідовністю об'ємів  $m=1,2,\dots,M$ , що обмежені фрагментами плоскопаралельних хвилеводів, які вигнуті в  $H$ -площині. Кожний з таких фрагментів має свій центр  $0_m$  полярної системи координат  $\{\rho_m, \phi_m\}$ , фіксований радіус кривизни  $R_m$  (у випадку  $R_m = \infty$  має місце прямолінійний фрагмент, рис. 2 а) та кут повороту  $\Phi_m$  (рис. 2 б). Ширина всіх хвилевідних фрагментів постійна і дорівнює  $W$ . Межі  $\mathbf{L}_{1m}$  і  $\mathbf{L}_{2m}$  окреслюють обчислювальну область у кожному фрагменті та слугують для сполучення сусідніх елементів ланцюжка: межа  $\mathbf{L}_{2m}$   $m$ -го ( $m=1,2,\dots,M-1$ ) фрагмента збігається з межею  $\mathbf{L}_{1m}$  ( $m+1$ )-го фрагмента. Перший (прямий) фрагмент може збуджуватися  $TE_{01}$ -хвилею, що набігає. У цьому разі на границі  $\mathbf{L}_{11}$  має бути поставлено ТПУ  $\mathbf{A}_{L_{11}}[E_x - E_{x,1}^{inc}]|_{y,z \in L_{11}} = 0$  (див. попередню задачу).

Коли низка фрагментів збуджується стороннім струмом ( $J_x(y_1, z_1, t) \neq 0$ ) (задача про кільцеподібний хвилевід), то на зовнішніх границях  $\mathbf{L}_{11}$  і  $\mathbf{L}_{2M}$  першого та останнього фрагментів накладаються умови симетрії:  $\partial E_x(y_1, z_1, t) / \partial z|_{y_1, z_1 \in L_{11}} = 0$  та  $\partial E_x(y_M, z_M, t) / \partial z|_{y_M, z_M \in L_{2M}} = 0$  (1).

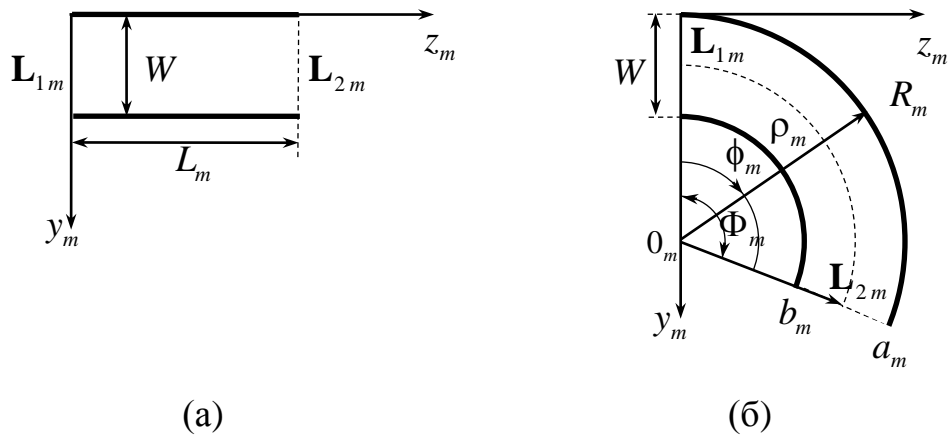


Рисунок 2 – загальний вигляд фрагментів, з яких складається хвилевідна лінія: пряма ділянка довжиною  $L_m$  (а) і з радіусом вигину  $R_m$  і кутом повороту  $\Phi_m$  (б)

$E$ -поляризовані хвилі в прямолінійних фрагментах (виключаючи границі  $\mathbf{L}_{1m}$  і  $\mathbf{L}_{2m}$ ) описуються такими початково-крайовими задачами для  $E_x$ -компоненти поля ( $\{y_m, z_m\}$  – супутня система координат, що прив’язана до однієї зі стінок хвилеводу, як це показано на рис. 2):

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[ \frac{\partial^2}{\partial y_m^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_m^2} - \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] E_x^{(m)}(y_m, z_m, t) = \delta_m^1 \eta_0 \frac{\partial J_x(y_m, z_m, t)}{\partial t}; \\ 0 \leq y_m \leq W, \quad 0 < z_m < L_m, \quad t > 0 \\ E_x^{(m)}(y_m, z_m, 0) = \frac{\partial E_x^{(m)}(y_m, z_m, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0; \\ E_x^{(m)}(0, z_m, t) = E_x^{(m)}(W, z_m, t) = 0; \quad t \geq 0. \end{array} \right. \quad (2)$$

Тут  $\delta_m^1$  – символ Кронекера, а  $m$  – номер фрагменту ( $1 \leq m \leq M$ ,  $M$  – загальна кількість прямих та вигнутих фрагментів).

Для вигнутих фрагментів (виключаючи межі  $\mathbf{L}_{1m}$  і  $\mathbf{L}_{2m}$ ) ці задачі мають такий вигляд ( $\{\rho_m, \phi_m\}$  – полярна система координат):

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[ \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial}{\partial \rho_m} \rho_m \frac{\partial}{\partial \rho_m} + \frac{1}{\rho_m^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi_m^2} - \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] E_x^{(m)}(\rho_m, \phi_m, t) = 0; \\ b_m < \rho_m < a_m, \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 < \phi_m < \Phi_m \text{ для } \Phi_m > 0 \\ \Phi_m < \phi_m < 0 \text{ для } \Phi_m < 0 \end{array} \right\}, \quad t > 0 \\ E_x^{(m)}(\rho_m, \phi_m, 0) = \frac{\partial E_x^{(m)}(\rho_m, \phi_m, 0)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0; \\ E_x^{(m)}(b_m, \phi, t) = E_x^{(m)}(a_m, \phi, t) = 0; \quad t \geq 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

Тут  $\phi_m = 0$  і  $\phi_m = \Phi_m$  – координати меж  $\mathbf{L}_{1m}$  і  $\mathbf{L}_{2m}$  криволінійного фрагменту, що розглядаємо (рис. 2 б),  $m$  – його номер.

На межах, де стикуються два суміжні фрагменти, накладено умови неперервності тангенційних компонент  $\vec{E}_{tg}$  та  $\vec{H}_{tg}$  векторів  $\vec{E}(y, z, t)$  та  $\vec{H}(y, z, t)$  напруженості електричного та магнітного полів.

**Розділ 3** дисертації присвячено проблемам коректного моделювання пасивного (дисперсійного) стискання ЕМІ у порожнистих металевих хвилевідних трактах. Актуальність згинання таких хвилеводів обумовлена, по-перше, можливістю стиснення в порожнистих структурах імпульсів із шириною спектра в одну-дві октави, і, по-друге, можливістю розмістити досить компактно більш довгу спрямовуючу структуру (довжиною у тисячі і десятки тисяч поперечного розміру),

що дуже важливо для того, щоб вхідні сигнали можна було коректно описати достатньо гладкими законами частотної й амплітудної модуляції.

У підрозділі 3.1 вивчено стискання амплітудно- та частотно-модульованих ЕМІ у вигнутих відрізках порожнистих хвилеводів з ідеально провідними металевими стінками. Проведено низку чисельних експериментів, в яких знайдено закони амплітудної  $A(t)$  та частотної  $k(t)$  модуляції вхідних імпульсів

$$u_1^{inc}(t) = A(t) \sin \left( \varphi_0 + \int_0^t k(\tau) d\tau \right) \quad (4)$$

для таких структур різної довжини, та отримано відповідні коефіцієнти підвищення імпульсної потужності  $\tilde{G}$ . Тут і далі  $u_1^{inc}(t)$  та  $u_1^{compr}(t)$  – значення просторово-часових амплітуд імпульсних  $TE_{01}$ -хвиль на границях  $L_{11}$  і  $L_{2M}$ : збуджуючої хвилі (з компонентою  $E_{x,p}^{inc}$  вектора напруженості електричного поля) та хвилі, що отримуємо на виході компресора. Для хвилеводної лінії з поперечним розміром 1 м та довжиною 1053,29 м (рис. 3 а), яку скручено у спіраль із зовнішніми розмірами  $54 \times 54$  м<sup>2</sup>, отримано коефіцієнт  $\tilde{G} \approx 75$  при ширині частотної смуги ЕМІ, що стискається, яка відповідала частотам, на яких хвилевід підтримує поширення першої та другої власних мод. А вибором радіусів кривизни окремих ділянок вдалося нівелювати відомий ефект повного запирання вигнутого хвилеводу. Розраховані закони модуляції вхідного імпульсу та часовий профіль стиснутого імпульсу показано на рис. 4. Для хвилевідної лінії довжиною 1521,75 м (рис. 3 б), у якій поперечний розмір не змінено, отримано коефіцієнти  $\tilde{G} \approx 100$  та  $\tilde{G} \approx 150$  для імпульсів із шириною частотної смуги, що дорівнює приблизно одній та половині октави. Для такої лінії продемонстровано можливість завдання законів модуляції  $A(t)$  та  $k(t)$  дискретними значеннями з кроком  $\Delta T$ , що перевищує характерний період осциляцій поля в десятки разів.

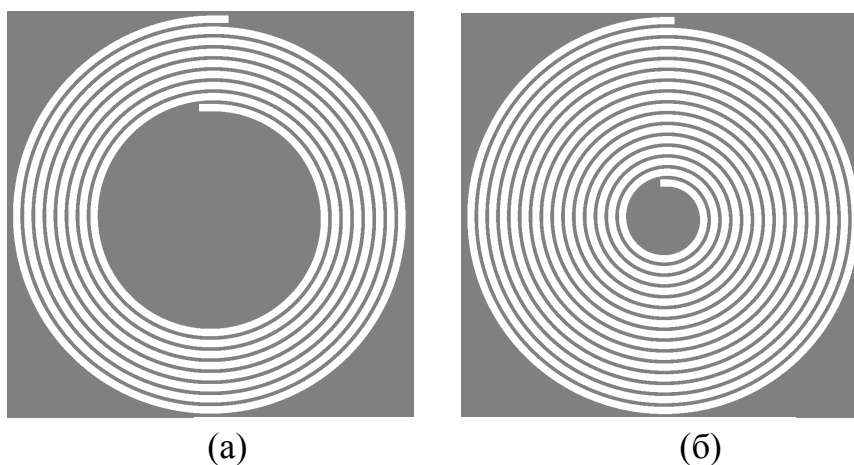


Рисунок 3 – Загальний вигляд хвилевідної лінії передачі, що складено з 50-х (а) та 92-х (б) вигнутих фрагментів

Показано, що навіть при використанні лінійної інтерполяції значень функцій  $A(t)$  та  $k(t)$  вихідний імпульс  $u_1^{compr}(t)$  демонструє стійку поведінку форми: при невеликих змінах параметру  $\Delta T$  отримуються невеликі зміни і в  $u_1^{compr}(t)$ .

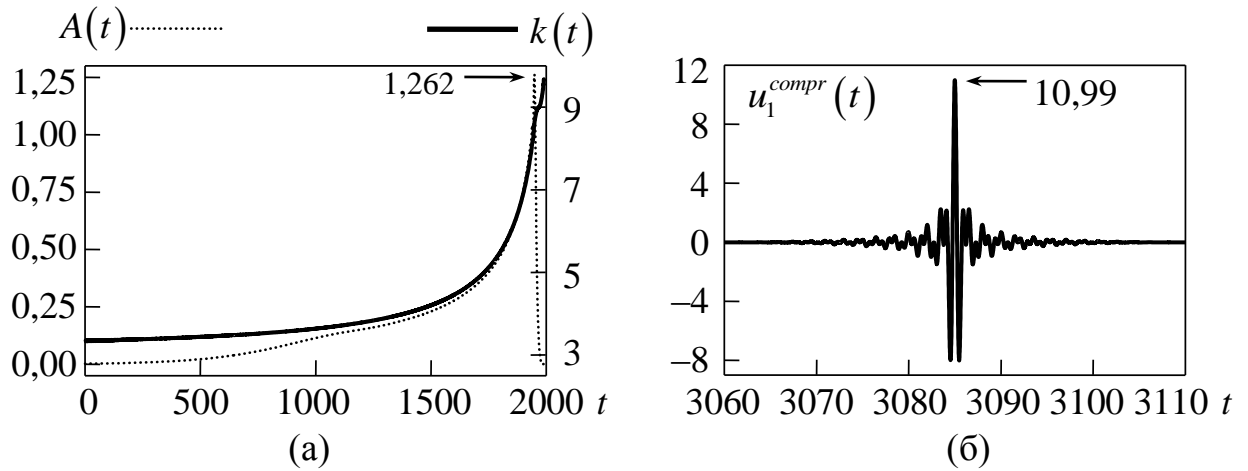


Рисунок 4 – Закони модуляції вхідного імпульсу (а) для відрізка хвилеводу, що скручено в спіраль (рис. 3а), і стиснутий імпульс (рис. 3б)

У підрозділі 3.2 промодельовано стискання ЕМІ, що збуджується нескінченно протяжною ниткою зі струмом у кільцеподібному хвилеводі, зображеному на рис. 5. Тут  $S$  та  $SP$  – проекції нитки зі струмом і площини симетрії задачі на площину  $yOz$ ;  $P$  – точка спостереження поля;  $O$  і  $O'$  – центри кривизни вигнутих хвилевідних фрагментів. Площини, що проходять через  $O$  і  $O'$  паралельно площині симетрії, обмежують прямі хвилевідні фрагменти, паралельні осі  $z$ . За допомогою методу ОХФ було розв'язано задачу знаходження часового профілю стороннього струму  $J_x(t)$  в цій нитці за часовим профілем  $u_1^{compr}(t)$ , який необхідно отримати в заданій точці спостереження. Важливою особливістю цієї задачі є те, що дві симетричні імпульсні хвилі, що поширюються від джерела, синхронно долають симетричний шлях і стискаються, приходячи в протилежну джерелу точку  $P$  з однаковим (заданим) часовим профілем. При цьому, внаслідок інтерференції цих хвиль, в точці  $P$  відбувається подвоєння амплітуди. Результати одного з проведених обчислювальних експериментів представлено на рис. 6. Тут  $R = 250$  м та  $W = 1$  м.

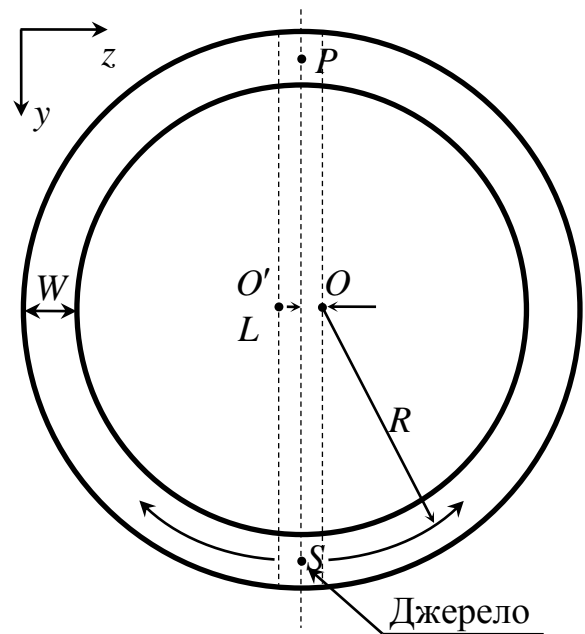


Рисунок 5 – Загальний вигляд кільцеподібного хвилеводу, що збуджений нескінченною ниткою зі струмом, яка паралельна його стінкам

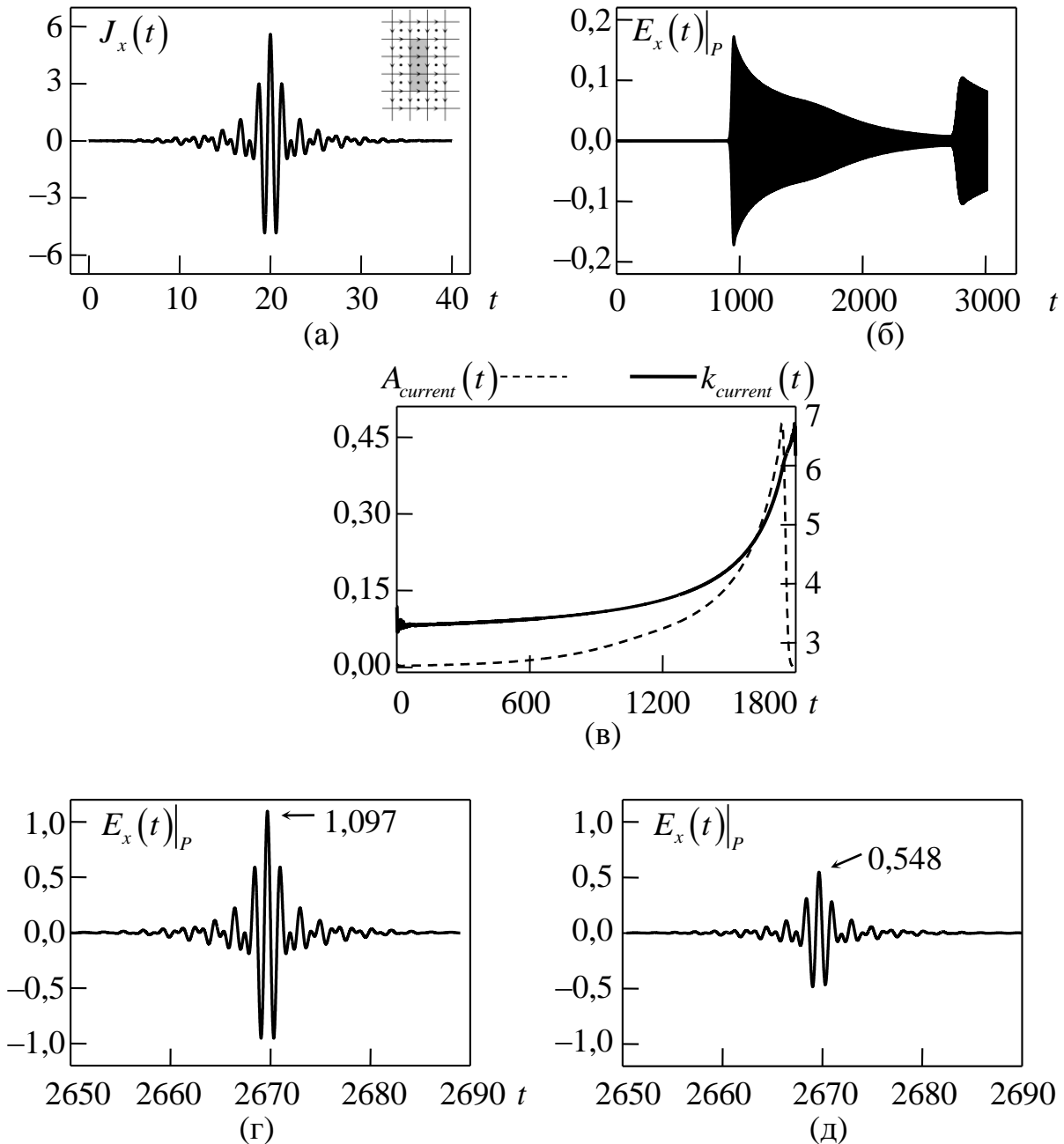


Рисунок 6 – Результат чисельного моделювання компресії електромагнітного імпульсу, що збуджено ниткою зі струмом у кільцеподібному хвилеводі (рис. 5): (а) імпульс току, що генерує цільовий імпульс; (б) імпульс, що поширився; (в) знайдені по цьому імпульсу закони модуляції для току, що генерує вхідний сигнал  $u_1^{inc}(t)$ , та його спектр; (г) стиснутий імпульс; (д) стиснутий імпульс для випадку прямолінійного відрізка хвилеводу, довжина якого дорівнює довжині кільцеподібного хвилеводу

**Розділ 4** дисертації присвячено моделюванню стиснення ЕМІ в діелектричних хвилеводах і середовищах. Вважалося, що у хвилеводах діелектрична проникність не залежить від частоти  $k = 2\pi/\lambda$  ( $\lambda$  – довжина хвилі у вільному просторі), тобто  $\varepsilon(k) = const$  і має місце суто хвилевідна дисперсія, що виникає внаслідок того, що

хвилі різної довжини в різній мірі зв'язані з направляючою лінією передачі і, відповідно, мають різну швидкість поширення. Для середовищ, що розглянуто, дисперсію пов'язано з залежністю відповідної діелектричної проникності від частоти –  $\varepsilon(k) \neq const$ .

У підрозділі 4.1 наведено результати чисельного модулювання компресії ЕМІ у відрітку скрученого в спіраль діелектричного хвилеводу для зменшення своїх габаритів (рис. 7). Такій відкритій хвилевідній лінії притаманні не тільки втрати на випромінювання у відкритий простір, а ще й ефект обміну енергією між витками спіралі. Це вкрай небажаний ефект, оскільки він суттєво спотворює просторово-часові та просторово-частотні характеристики (у порівнянні з таким же відрізком прямолінійного хвилеводу). Проте, як показали дослідження, метод ОХФ може бути використано і за таких несприятливих умов.

На рис. 8 (а) та (б) (тут  $W = 1$  м – ширина лінії,  $d = 0.04$  м,  $\varepsilon_1 = 2,0$  – діелектрична проникність оболонки лінії,  $\varepsilon_2 = 11,5$  – діелектрична проникність центральної частки лінії, довжина лінії дорівнює  $L \approx 424,12$  м) показано часовий профіль та спектр вхідного імпульсу  $u_1^{inc}(t)$  на віртуальній границі  $L_1$ , який розраховано за допомогою методу ОХФ. На рис. 9 наведені ті ж характеристики для стиснутого імпульсу  $u_1^{compr}(t)$  на віртуальній границі  $L_2$ . Спектр, що наведено на рис. 9 б, розраховано за умови, що  $u_1^{compr}(t) = 0$  при  $t \notin [870, 920]$ , спектр на рис. 9 г – за відсутності такої штучної умови.

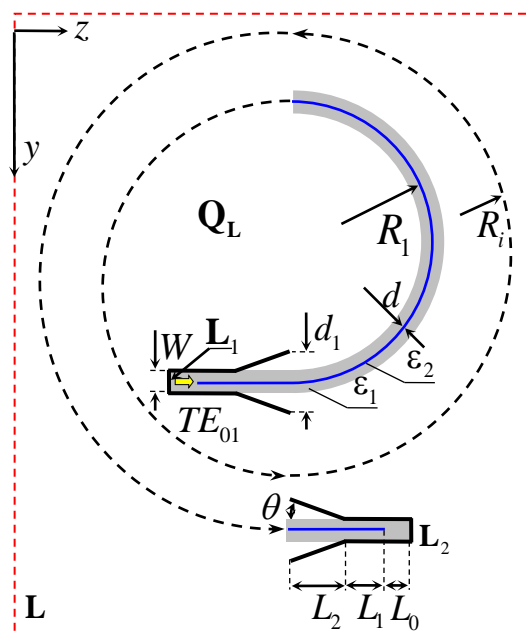


Рисунок 7 – загальний вигляд діелектричного хвилеводу, що скручено в спіраль

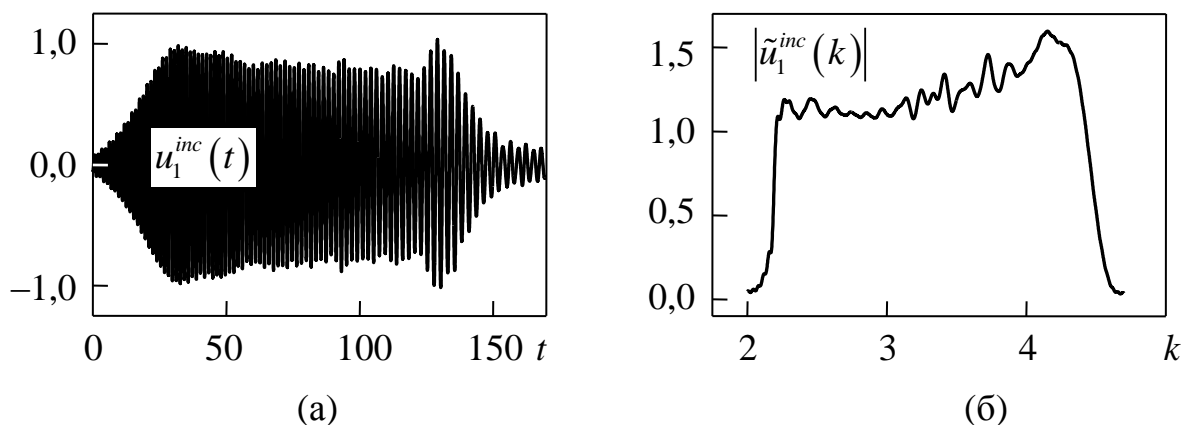


Рисунок 8 – Часовий профіль вхідного імпульсу  $u_1^{inc}(t)$  (а) та його амплітудний спектр  $|\tilde{u}_1^{inc}(k)|$  (б)

Проведені обчислювальні експерименти підтвердили придатність та надійність методу ОХФ при його застосуванні до вирішення досить складних задач аналізу і синтезу дисперсійних утискувачів ЕМІ, зокрема, як це продемонстровано вище, утискувачів, де між окремими ділянками відкритої дисперсійної лінії можливий обмін енергією.

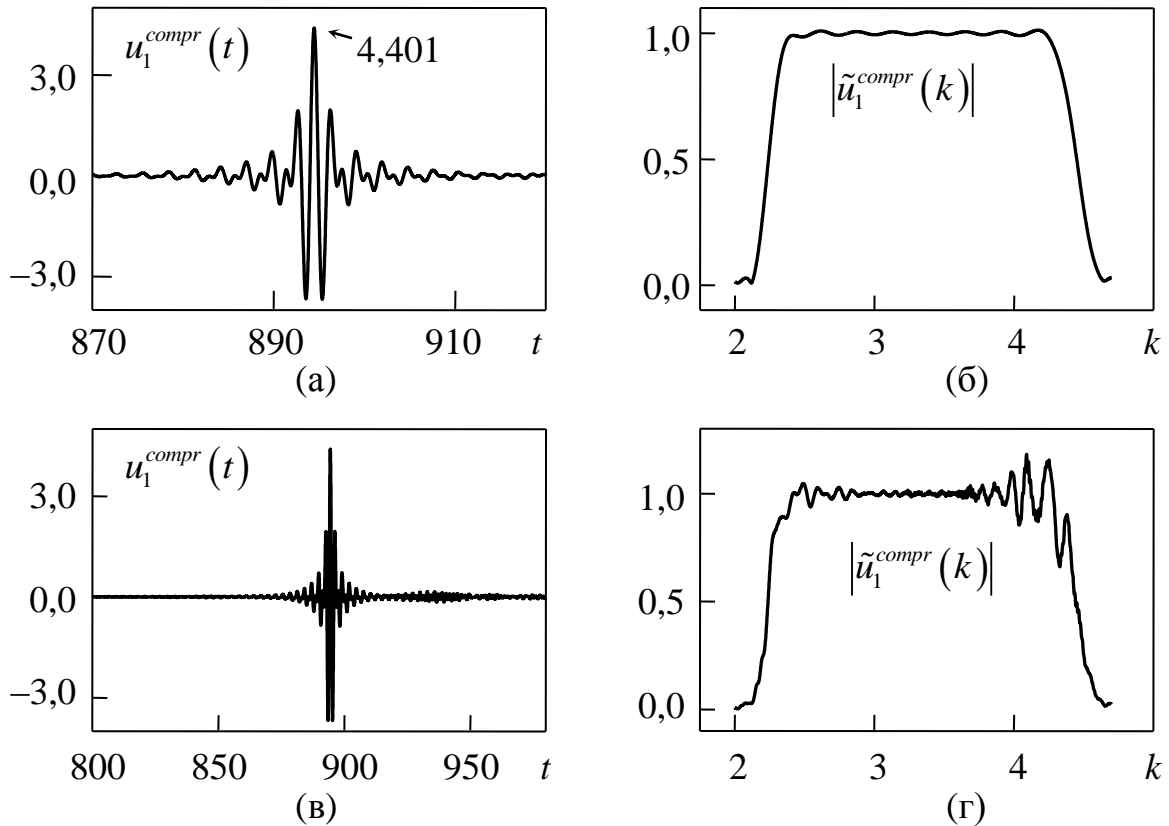


Рисунок 9 – Фрагменти стиснутих імпульсів  $u_1^{compr}(t)$  (а), (в) та їх спектри  $|\tilde{u}_1^{compr}(k)|$  (б), (г)

У підрозділі 4.2 запропоновано модель імпульсного випромінювача з компресією сигналу в діелектричному хвилеводі (рис. 10). На рис. 11 представлено розраховані профілі імпульсу струму  $J_x(t)$  (нитка зі струмом займає у площині  $yOz$  точку  $g_1$ ), що збуджує вхідний імпульс, стиснутого імпульсу  $E_x(g_2, t)$  та їх спектри. Ширина робочої смуги дорівнювала, приблизно, двом октавам (від 1,4 ГГц до

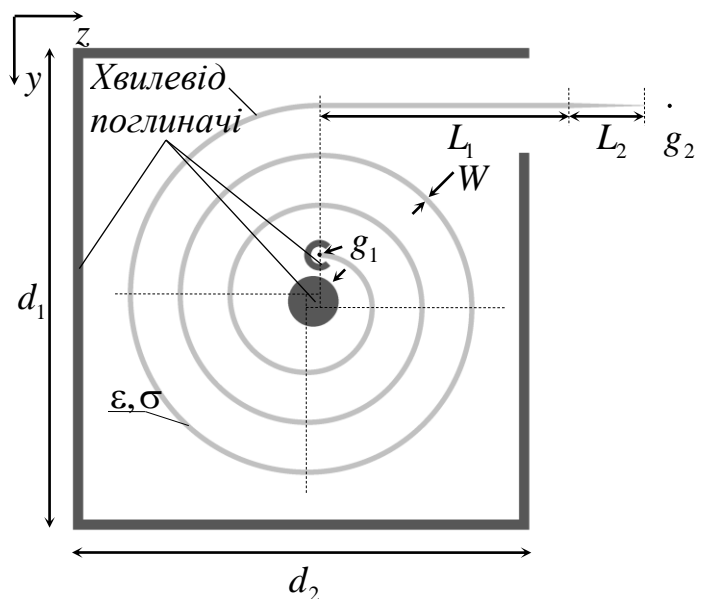


Рисунок 10 – Загальний вигляд запропонованої моделі випромінювача

5,7 ГГц), тривалість стиснутого імпульсу сягала 2 нс, а коефіцієнти стиснення та корисної дії дорівнювали, відповідно,  $\beta = 8,6$  та  $\gamma \approx 0,37$ . Втрати у діелектрику відповідали величині  $\tan \delta \approx 5 \cdot 10^{-4}$ , а розрахунки велися для таких значень параметрів:  $W = 5$  мм,  $L_1 = 250$  мм (прямолінійний відрізок),  $L_2 = 75$  мм (клиновидне звуження),  $L \approx 2563,4$  мм (загальна довжина),  $\varepsilon = 1$ ,  $\sigma = 10$  См/м,  $d_1 \times d_2 = 482,25 \times 457,5$  мм.

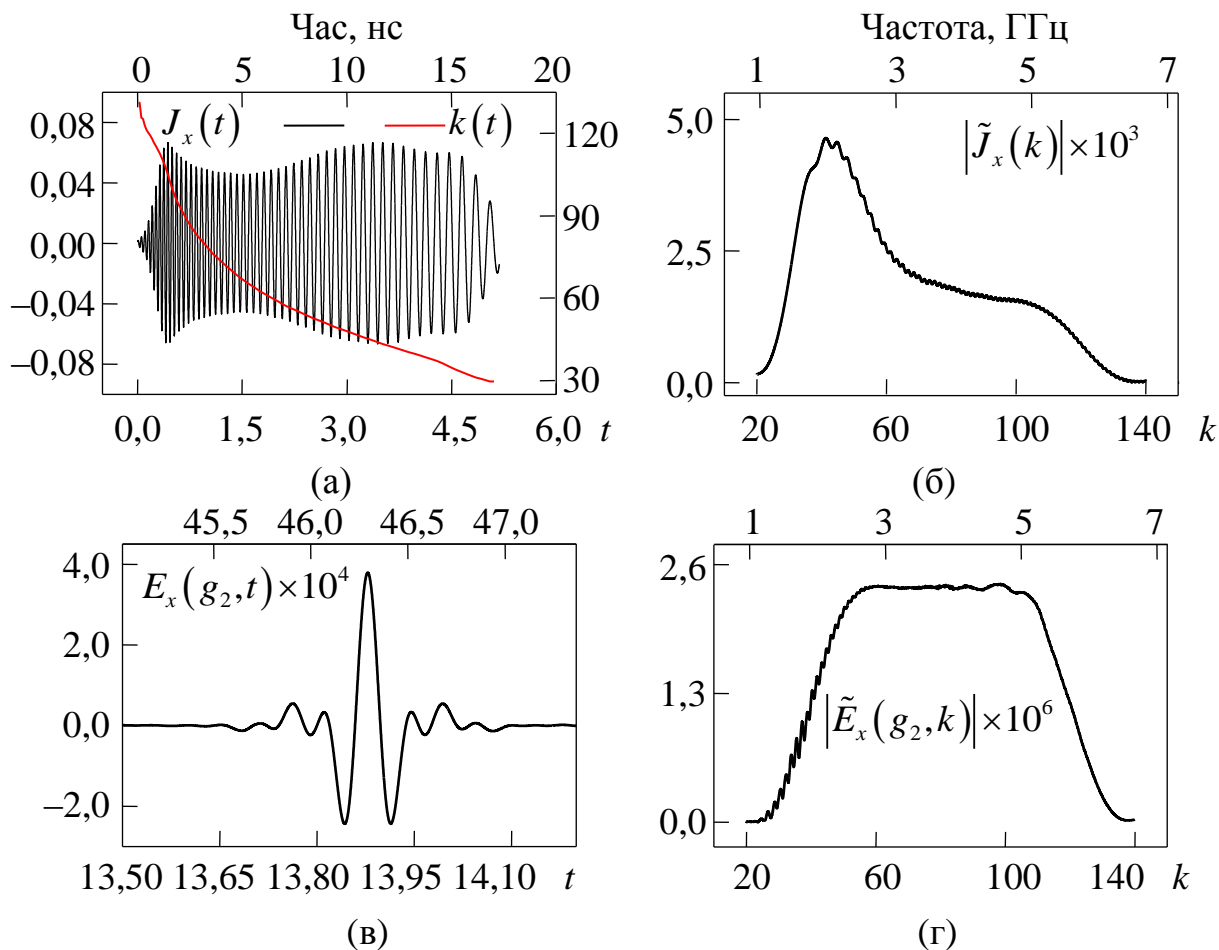


Рисунок 11 – Часовий профіль імпульсу стороннього струму для випромінювача з рис. 10, що розрахований методом ОХФ (а) (червона лінія – закон частотної модуляції  $k(t)$ ) і його амплітудний спектр (б). Електричне поле  $E_x(g_2, t)$ , що згенеровано випромінювачем в точці  $g_2$  (в), і його амплітудний спектр (г)

У підрозділі 4.3 промодельовано стиснення ЕМІ обох поляризацій в несиметричному діелектричному хвилеводі, що розташований на металевій підкладці (рис. 12).

За результатами чисельного експерименту було досягнуто 7-кратне стиснення  $E$ -поляризованого імпульсу в спектральній смузі від 7,2 ГГц до 31 ГГц (приблизно дві октави), та 16-кратне стиснення  $H$ -поляризованого імпульсу в смузі від 21,5 ГГц до 35,8 ГГц (менше октави). Отримані тут результати можуть бути використані при проектуванні систем передачі даних, що включають в себе хвилевідні лінії передачі з дисперсією групової швидкості.



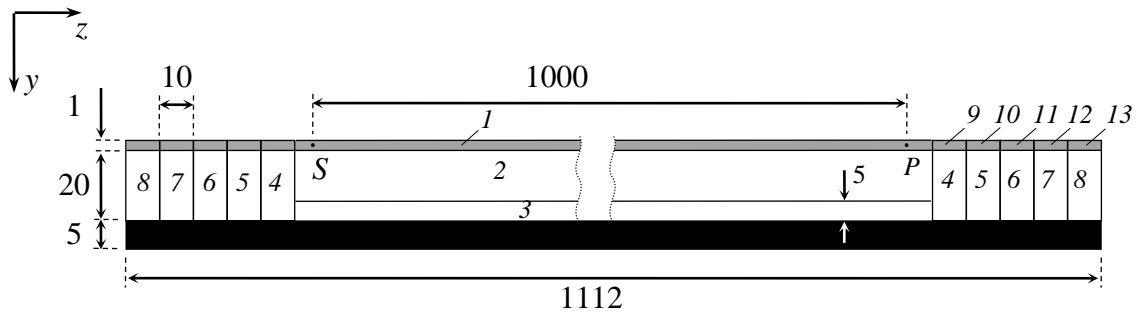


Рисунок 12 – Схема діелектричного хвилеводу, що розміщений на ідеально провідній основі (виділена чорним кольором): 1, 2, 3 – діелектричні елементи, що утворюють хвилевідну лінію передачі, 4, 5, ..., 13 – діелектрики, що імітують узгоджені хвильові навантаження. Всі розміри вказані в міліметрах. Проникність шару 1  $\varepsilon_1 = 20$  ( $\tan \delta \approx 5 \cdot 10^{-4}$ ), шару 2 –  $\varepsilon_2 = 2$  ( $\tan \delta \approx 3 \cdot 10^{-4}$ ), шару 3 –  $\varepsilon_3 = 2$  ( $\tan \delta \approx 0,38$ )

У підрозділі 4.4 представлено результати чисельного моделювання стиснення ЕМІ оптичного та інфрачервоного діапазонів в безмежному об'ємі, що заповнено середовищем із дисперсією діелектричної проникності (рис. 13). Було розглянуто два середовища: кварц і полістирол. Їх дисперсійні характеристики описано наступними формулами Селмейєра:

$$\varepsilon(\lambda) = 1 + \frac{1,4435\lambda^2}{\lambda^2 - 0,020216}; \quad 0,437 \text{ мкм} < \lambda < 1,05 \text{ мкм} \quad (5)$$

для полістиролу [5\*] і

$$\varepsilon(\lambda) = 1 + \frac{0,6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0,0684043^2} + \frac{0,4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0,1162414^2} + \frac{0,8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9,896161^2}; \quad (6)$$

$$0,21 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 6,7 \text{ мкм}$$

для кварцу [6\*, 7\*]. Діелектричні втрати в цих середовищах відсутні. У вказаних діапазонах залежності (5) і (6) мають дві монотонні ділянки. Одна з них лежить в короткохвильовій (переважно оптичній) частині спектру і відповідає нормальній дисперсії групової швидкості. Друга знаходиться в довгохвильовій (інфрачервоній) області і відповідає аномальній дисперсії. Відповідно для кожного середовища було обрано два цільових імпульси і для цих цільових імпульсів отримано «вхідні» імпульси для трьох значень  $L$ : 1 см, 10 см і 1 м.

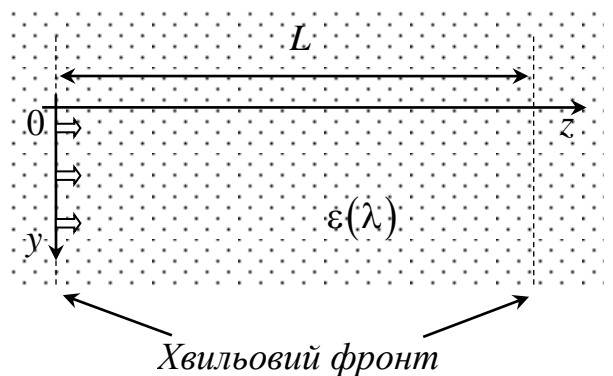


Рисунок 13 – Схематичне зображення геометрії задачі

Результати чисельного моделювання компресії ЕМІ для кварцу на дистанції  $L=1$  м представлено на рис. 14 ( $E$ -поляризація поля).

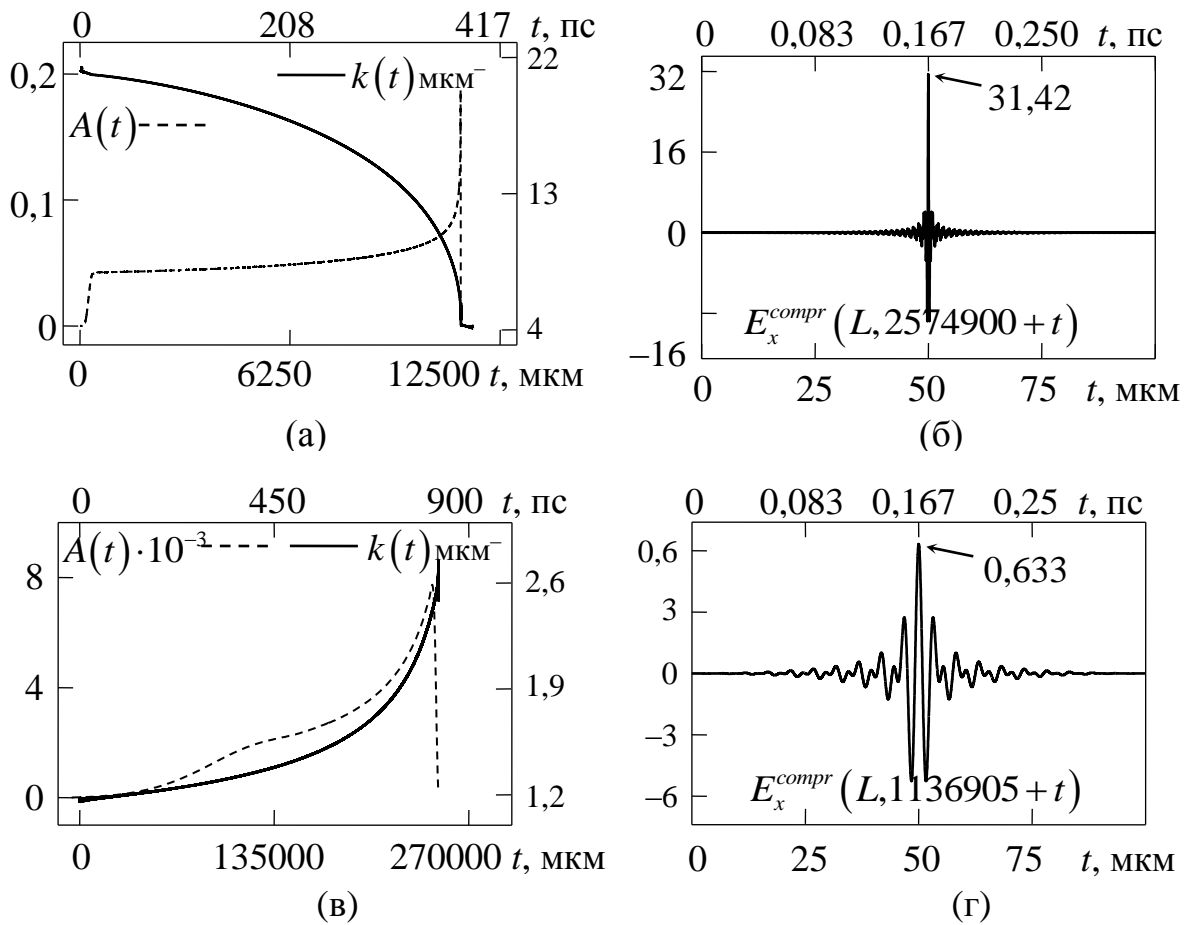


Рисунок 14 – Закони модуляції  $A(t)$  і  $k(t)$  ЕМІ  $E_x(0,t)$ , що стискаються в кварцовому склі в області нормальної (а) і аномальної (в) дисперсій групової швидкості та профілі стиснутих імпульсів (б), (г)

Проведений чисельний експеримент показав, що в таких поширених оптичних матеріалах як полістирол і кварцове скло, можливе стискання ЕМІ оптичного й інфрачервоного діапазонів із шириною спектральної смуги до однієї-двох октав.

Отримані коефіцієнти збільшення пікової потужності  $\tilde{G}$  сягали до 20 дБ з коефіцієнтами компресії  $\beta$  до 2700 на одному метрі оптичної траси.

## ВИСНОВКИ

В дисертації розв'язано важливу науково-практичну задачу, що пов'язана з пошуком ефективних шляхів підвищення досягнутих на сьогодні електродинамічних характеристик дисперсійних (пасивних) компресорів ЕМІ. Конкретно, роботу присвячено розвитку та практичній реалізації (на рівні алгоритмів, програм, нових знань про фізику процесів стискання імпульсів, прототипів пристроїв з унікальними характеристиками) строго обґрунтованих підходів до розгляду широкого кола модельних початково-крайових задач,

пов'язаних: (а) з аналізом і синтезом дисперсійних елементів із шириною робочого діапазону в декілька октав, елементів із мінімальними втратами енергії, що передається, та елементів із мінімальними масогабаритними параметрами; (б) з організацією (поки що на рівні моделей) імпульсних систем радіолокації та передачі даних, що поєднують процеси випромінювання та компресії або просторово-часового фокусування ЕМІ.

Основні, найбільш важливі результати роботи та висновки, що з них випливають, перераховано нижче.

- 1) Вперше строго розглянуто стиснення імпульсу, що збуджується ниткою зі струмом в кільцеподібному хвилеводі. Отримано закони модуляції стороннього струму, для якого дві імпульсні хвилі, що симетрично відходять від нитки зі струмом, приходять до протилежної точки хвилеводу з заданим часовим профілем та інтерферують між собою, що приводить до додаткового подвоєння електричного поля в цій точці.
- 2) Доведено, що лінійна апроксимація законів модуляції вхідних ЕМІ по амплітуді та частоті не призводить до радикальної зміни форми стиснутого імпульсу.
- 3) Синтезовано прототип імпульсної антени, яка спочатку стискає ЕМІ у вигнутому у спіраль діелектричному хвилеводі, а потім його випромінює. Для такої антени методом ОХФ знайдено точний часовий профіль стороннього струму по заданому профілю ЕМІ, що випромінюється. Отримано коефіцієнт стиснення, що дорівнює 8,6 при тривалості стиснутого імпульсу в 2 нс і ширині спектральної смуги приблизно в дві октави (діапазон  $1,4 \div 5,7$  ГГц).
- 4) Розглянуто особливості процесу стиснення надширококустових імпульсів у несиметричному діелектричному хвилеводі, який розміщено на металевій підкладці. Для такої лінії довжиною 1,0 м отримано 7-кратне стиснення  $E$ -поляризованого імпульсу в спектральній смузі  $7,2 \div 31$  ГГц і 16-кратне стиснення  $H$ -поляризованого імпульсу у смузі  $21,5 \div 35,8$  ГГц.
- 5) Вперше строго проаналізовано стиснення оптичних і інфрачервоних ЕМІ в безмежному об'ємі, який заповнено полістиролом або кварцовим склом. Показано, що в таких поширених і порівняно недорогих оптичних матеріалах можливо стиснення ЕМІ з шириною спектральної смуги до 2-х октав і збільшення пікової потужності ЕМІ до 20 дБ на одному метрі оптичного шляху.

## СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1\*. Пазинін В. Л. Моделювання і аналіз процесів пасивної та активної компресії електромагнітних імпульсів мікрохвильового і оптичного діапазонів // Дис. д.ф.-м.н., 01.04.03 – радіофізика, – Харків. – 2019.
- 2\*. Зельдович Б. Я. Обращение волнового фронта при вынужденном рассеянии света // *Успехи физических наук*. – 1982. – Т. 138, вып. 2. – С. 249–288.
- 3\*. Pazyinin V. L., Sirenko K. Y., Sirenko Y.K. High-power short pulses compression: Analysis and modeling. Ch. 6 in book *Electromagnetic Waves in Complex Systems. Selected Theoretical and Applied Problems*. – New York: Springer, 2016. – P. 327–385.

- 4\*. Taflove A., Hagness S.C. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. – Boston, London: Artech House, 2000. – 872 p.
- 5\*. Волков Е. А. Численные методы: Уч. пособие для вузов. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
- 6\*. Sultanova N., Kasarova S., Nikolov I. “Dispersion properties of optical polymers” Proceedings of the International School and Conference on Photonics, PHOTONICA09, Vol. 116, 2009.
- 7\*. Malitson I. H., Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica, *Journal of the Optical Society of America*. – Vol. 55, iss. 10. – P. 1205–1209.
- 8\*. Handbook of Optical Constants of Solids. Volume 1. Palik E.D. ed. – 1998. – 999 p.

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Pazynin V. L., Maiboroda M. V. Electromagnetic pulse compression in sections of helically coiled waveguides // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2017. – Vol. 76, iss. 3. – P. 209–225.
2. Pazynin V. L., Maiboroda M. V. Compression of electromagnetic pulses with piecewise linear laws of amplitude and frequency modulation // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2017. – Vol. 76, iss. 4. – P. 277–284.
3. Pazynin V. L., Maiboroda M. V. Compression of electromagnetic pulses in dielectric waveguides of a finite length // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2017. – Vol. 76, iss. 14. – P. 1219–1230.
4. Pazynin V. L., Maiboroda M. V. Modeling of the compression of wave packets induced by a current filament in a plane-parallel waveguide // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2017. – Vol. 76, iss. 16. – P. 1391–1404.
5. Maiboroda M. V., Pazynin V. L. Compression of optical and infrared pulses in quartz crystals: a rigorous simulation // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2019. – Vol. 78, iss. 1. – P. 11–18.
6. Pazynin V. L., Maiboroda M. V. Compression of electromagnetic pulses in an asymmetric dielectric waveguide // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2019. – Vol. 78, iss. 2. – P. 97–107.
7. Pazynin V. L., Maiboroda M. V., Shmat’ko A. A. The model of pulse radiator with output signal compression in helically coiled dielectric waveguide // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2019. – Vol. 78, iss. 17. – P. 1509 – 1520.
8. Maiboroda M. V., Pazynin V. L., Sliusarenko H. O. 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)*. – 2017. – P. 104–107.
9. Maiboroda M. V., Pazynin V. L., Sliusarenko H. O. 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)*. – 2017. – P. 228–230.

## АНОТАЦІЯ

**Майборода М. В. Аналіз і синтез хвилевідних елементів дисперсійних компресорів електромагнітних імпульсів.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків, 2021.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню важливої науково-практичної проблеми строгого моделювання, аналізу і синтезу хвилевідних елементів дисперсійних компресорів електромагнітних імпульсів (ЕМІ). Розглянуто два типи задач: двовимірні задачі в декартовій системі координат для  $E$ -поляризованих хвиль та двовимірні задачі для  $E$ -поляризованих хвиль, що поширюються у вигнутих у  $H$ -площині відрізках плоскопаралельних хвилеводів.

Дослідження процесів стискання ЕМІ базувалося, в основному, на методі обернення хвильового фронту. Результати обчислювальних експериментів підтвердили, зокрема, його придатність до аналізу систем з обміном енергією між ділянками дисперсійної лінії та можливість отримання за його допомогою результатів, що потрібні при додатковій часовій селекції вихідного імпульсу.

Розглянуто та проаналізовано низку нових моделей дисперсійних стискаючих пристроїв, кожен з яких має певний набір унікальних характеристик (робочий діапазон, ширина спектральної смуги, коефіцієнт компресії, масогабаритні параметри, тощо) і може слугувати прототипом при створенні компресорів і компресорів-випромінювачів ЕМІ різного призначення.

**Ключові слова:** початково-крайова задача, метод точних поглинаючих умов, метод кінцевих різниць, метод обернення хвильового фронту, компресія електромагнітних імпульсів, дисперсія групової швидкості, вигнутий у спіраль діелектричний хвилевід.

## АННОТАЦИЯ

**Майборода М. В. Анализ и синтез волноводных элементов дисперсионных компрессоров электромагнитных импульсов.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. – Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 2021.

Диссертационная работа посвящена решению важной научно-практической проблемы строгого моделирования, анализа и синтеза волноводных элементов дисперсионных компрессоров электромагнитных импульсов (ЭМИ). Рассмотрено два типа задач: двумерные задачи в декартовой системе координат для  $E$ -поляризованных полей и двумерные задачи для  $E$ -поляризованных полей, но таких, которые распространяются в изогнутых в  $H$ -плоскости отрезках плоскопаралельных волноводов.

Исследования процессов сжатия ЭМИ основаны на методе обращения волнового фронта. Результаты численных экспериментов подтвердили, в частности,

его пригодность к анализу систем с обменом энергией между участками дисперсионной линии и возможность получения с его помощью результатов, которые необходимы при дополнительной временной селекции входящего сигнала.

Рассмотрен ряд новых моделей дисперсионных сжимающих устройств, каждое из них обладает некоторым набором уникальных характеристик (рабочий диапазон, ширина спектральной полосы, коэффициент сжатия, массогабаритные параметры и т. д.) и может быть прототипом при создании компрессоров и компрессоров-излучателей ЭМИ разного назначения.

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

## ABSTRACT

**Maiboroda M. V. Analysis and synthesis of waveguide elements of dispersive compressors of electromagnetic pulses.** – As a manuscript.

Thesis for scientific degree of Candidate in physics and mathematics on speciality 01.04.03 – radiophysics. – O. Ya. Usikov institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The thesis is devoted to solving an important scientific and practical problem of rigorous modeling, analysis and synthesis of the elements of passive compressors of electromagnetic pulses (EMP). Two types of problems are considered: two-dimensional problems in the Cartesian coordinate system for  $E$ -polarized waves and two-dimensional problems for  $E$ -polarized waves propagating in segments of curved in the  $H$ -plane-parallel waveguides.

The study of EMI compression processes was based on the method of wave front rotation. The results of computational experiments confirmed its suitability for the analysis of systems with energy exchange between sections of the dispersion line and the possibility of obtaining with it the results required for additional time selection of the output pulse.

A number of new models of dispersion compression devices are considered and analyzed, all of them has a certain set of unique characteristics (working range, spectral bandwidth, compression ratio, weight and size parameters, etc.) and can be a prototype in the creation of compressors and EMI emitting compressors for various purposes.

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