

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

АНДРІЙЧУК
Михайло Іванович



УДК 519.6:621.371

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЧИСЛОВА ОПТИМІЗАЦІЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ВИПРОМІНЮЮЧИХ І ХВИЛЕВОДНИХ СИСТЕМ
ТА ФОРМУЮЧИХ СЕРЕДОВИЩ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор
Войтович Микола Миколайович,
Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України,
завідувач відділу числових методів математичної фізики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дубровка Федір Федорович,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”,
завідувач кафедри теоретичних основ радіотехніки

доктор технічних наук, професор
Бомба Андрій Ярославович,
Рівненський державний гуманітарний університет,
завідувач кафедри інформатики і прикладної математики

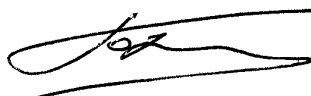
доктор технічних наук, професор
Дивак Микола Петрович,
Тернопільський національний економічний університет,
декан факультету комп'ютерних інформаційних технологій

Захист відбудеться “_3_” _____ грудня _____ 2015 р. о _13⁰⁰_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розіслано “_30_” _____ жовтня _____ 2015 р.

Учений секретар
спеціалізованої ради Д 35.052.05,
доктор технічних наук, професор



Р. А. Бунь

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На етапі проектування випромінюючих систем у першу чергу виникає необхідність розробки їх математичних моделей. Такі моделі формуються на основі певних спрощень фізичної суті процесу і враховують, як правило, тільки найбільш визначальні характеристики оточуючого середовища і самої випромінюючої системи. Ці моделі використовують загальновідомі електродинамічні чи акустичні положення і в певній мірі конструктивні особливості системи. У відповідності до задач, які повинні вирішувати випромінюючі системи, вони описуються різними математичними моделями, які відрізняються одна від одної конструктивними рішеннями і мають принципово різні характеристики. Загального підходу до розробки процесу моделювання випромінюючих і хвилеводних систем та середовищ, які формують електромагнітні чи акустичні поля заданої структури, не існує.

У зв'язку з необхідністю застосування математичного моделювання до широкого класу випромінюючих систем виникає проблема розробки загальної методології моделювання, на основі якої можна було б забезпечити як адекватний інженерній практиці опис загальних особливостей і характеристик цих систем, так і специфіку їхньої конструкції. Розробка такого підходу повинна забезпечити врахування існуючих нелінійних залежностей реальних фізичних процесів від зміни зовнішніх і внутрішніх факторів та параметрів у вигляді нелінійних рівнянь різних типів.

Необхідність розробки такого узагальненого підходу пояснюється розширенням і ускладненням інженерно-практичних задач, які виникають у сучасній радіотехніці, електроніці, акустиці і зв'язку. При конструюванні випромінюючих систем необхідно враховувати жорсткі умови як до характеристик спрямованості системи, так і до проблеми реалізованості знайденого в результаті розв'язання задачі синтезу амплітудно-фазового чи фазового розподілу струмів (полів) в апертурі або на елементах системи. Це зумовлює в загальному контексті розробку нових математичних моделей для аналізу (розв'язання прямих задач) сучасних випромінюючих систем, які мають складну геометрію, описуються рівняннями Максвелла чи хвильовими рівняннями з доповненням відповідними граничними умовами і умовами випромінювання на безмежності.

Наступним важливим етапом є формулювання певних класів оптимізаційних задач, які б у результаті їх розв'язання дозволяли визначати і покращувати в межах заданого критерію не лише розподіл струму (або поля), але й геометрію та інші конструктивні параметри випромінюючої системи. Найбільш повно враховує цей комплекс вимог варіаційний підхід.

Особливо актуальними для практики на теперішній час є класи задач синтезу за амплітудними та енергетичними діаграмами спрямованості (ДС), оскільки у багатьох інженерних застосуваннях формулюються вимоги не до повної ДС (комплексної функції), а тільки до її амплітуди або до квадрату амплітуди (енергетичної ДС). Така постановка задач породжує новий клас

нелінійних задач, методи розв'язання яких потребують подальших модифікацій та розвитку.

Таким чином, **актуальною** є науково-технічна проблема, пов'язана з необхідністю розвинення теорії математичного моделювання випромінюючих систем та формуючих середовищ на основі загального операторного представлення розв'язків прямих задач, застосування єдиного варіаційного підходу до визначення оптимальних параметрів цих систем і середовищ, які забезпечують виконання вимог до них у межах вибраного критерію оптимізації, і на цій основі використання отриманих теоретичних результатів в інженерній практиці аналізу й синтезу плоских випромінюючих і хвилеводних систем, та формування середовищ з бажаними електродинамічними чи акустичними властивостями.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами темами. Робота виконувалась згідно з планами досліджень Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України. Автор був відповідальним виконавцем таких тем:

– “Розвиток ітераційних числових методів розв'язування нелінійних інтегральних рівнянь з галуженням розв'язків, нелінійних спектральних задач та задач розпізнавання форми об'єктів у хвильовому полі” (термін виконання 2006-2009 рр., державний реєстраційний номер 0106U00596);

– “Розвиток методів та алгоритмів розв'язування конкретних прямих та обернених задач для рівнянь з частинними похідними стосовно технічних, біологічних та економічних систем” (термін виконання 2007-2011 рр., державний реєстраційний номер 0107U000365);

– “Розвиток методів розв'язування та дослідження спектральних властивостей нелінійних багатовимірних інтегральних та диференціальних рівнянь та їх систем, які виникають в задачах з вільною фазою та обернених задачах розсіювання” (термін виконання 2010-2013 рр., державний реєстраційний номер 0109U008762);

– “Розвиток методів дослідження прямих і обернених задач із некласичними умовами для еволюційних рівнянь та моделювання фізичних процесів у полях різної природи” (термін виконання 2012-2016 рр., державний реєстраційний номер 0111U009685);

– “Розвиток числових методів розв'язування багатовимірних нелінійних прямих і обернених спектральних задач та спеціальних класів інтегральних рівнянь, які виникають в теорії хвильових полів” (термін виконання 2014-2018 рр., державний реєстраційний номер 0113U007686).

В рамках цих робіт автором було розвинуто методологію математичного моделювання плоских випромінюючих і хвилеводних систем та неоднорідних формуючих середовищ, розроблено та обґрунтовано числові методи розв'язання оптимізаційних задач на визначення конструктивних параметрів таких систем і середовищ.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розвиток теорії математичного моделювання та оптимізації параметрів випромінюючих систем

і формуючих середовищ із врахуванням інженерних вимог як до характеристик спрямованості систем, так і до проблеми реалізованості знайденого в результаті розв'язання задач синтезу амплітудного чи фазового розподілу струмів в апертурі чи на елементах системи та характеристик розсіювання формуючих середовищ. Це передбачає створення нових та вдосконалення існуючих моделей цих систем і середовищ, розробку та обґрунтування числових методів оптимізації їхніх параметрів і застосування розробленої теорії та методів для розв'язання задач аналізу і синтезу плоских решіток та формування неоднорідних середовищ із заданими електромагнітними і акустичними характеристиками.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі задачі:

- сформулювати математичні моделі аналізу та синтезу плоских випромінюючих систем за амплітудними характеристиками з використанням фізично обґрунтованих математичних постановок прямих та варіаційних формулювань обернених задач;

- провести дослідження кількості і властивостей розв'язків нелінійних інтегральних і матричних рівнянь, що виникають у сформульованих варіаційних задачах;

- з використанням результатів дослідження кількості розв'язків нелінійних рівнянь та їхніх властивостей, розробити числові методи для визначення оптимальних характеристик випромінюючих систем, які розглядаються в роботі;

- на основі сформульованих математичних моделей розробити аналітико-числові методи розв'язування задач формування параметрів середовищ із заданими чи близькими до заданих електромагнітними та акустичними властивостями;

- на основі запропонованих методів та алгоритмів розробити програмне забезпечення для розрахунку і оптимізації параметрів випромінюючих і хвилеводних систем та формуючих середовищ.

Об'єктом дослідження є процес розсіювання і випромінювання електромагнітних та акустичних полів у плоских випромінюючих системах і неоднорідних середовищах.

Предметом дослідження є математичні моделі аналізу та синтезу плоских випромінюючих систем і формуючих середовищ, кількісні та якісні характеристики розв'язків відповідних нелінійних оптимізаційних задач, числові та аналітико-числові методи знаходження оптимальних параметрів цих систем і середовищ у межах розроблених моделей.

Методи дослідження. Для створення математичних моделей плоских випромінюючих і хвилеводних систем та формуючих середовищ використано методи електродинаміки та акустики, зокрема, граничних інтегральних рівнянь, функції Гріна, квазіоптики, теорії лишків функції комплексної змінної, Бубнова-Гальоркіна та асимптотичні методи. Для розробки і обґрунтування методів оптимізації параметрів цих систем і середовищ використано методи функціонального аналізу, варіаційного числення, обчислювальної математики та їхні узагальнення й модифікації, що забезпечило збіжність ітераційних

процесів розв'язання нелінійних інтегральних рівнянь та їх систем, які виникають внаслідок формулювання відповідних варіаційних задач.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-технічну проблему розвинення теорії математичного моделювання випромінюючих систем та формуючих середовищ на основі загального операторного представлення розв'язків прямих задач і застосування єдиного варіаційного підходу до визначення оптимальних параметрів цих систем і середовищ.

У процесі вирішення цієї проблеми отримано такі наукові результати:

1. Вперше на основі векторної електродинамічної моделі розроблено метод розв'язання задач аналізу та оптимізації параметрів мікросмушкової випромінюючої системи. На відміну від існуючих методів, які обмежувалися розв'язанням систем двовимірних інтегральних рівнянь, запропонований підхід зводить розв'язання прямої електродинамічної задачі до сумування швидкозбіжних рядів. Застосування методу дозволило отримати явний вираз для елементів імпедансної матриці, що дало змогу визначити елементи матриці розсіювання з малими обчислювальними витратами.
2. На основі вдосконаленої варіаційної постановки задачі синтезу за енергетичним критерієм з додатковою умовою рівності норм синтезованої і заданої ДС вперше розроблено метод, який забезпечує відсутність нульових розв'язків відповідного нелінійного рівняння Ейлера, що свідчить про більш адекватне врахування фізичних вимог до отриманих розв'язків задачі синтезу. Розроблені числові методи розв'язання задачі синтезу забезпечують збіжність відповідних ітераційних процесів.
3. Вперше розроблено новий аналітико-числовий метод розв'язування задачі розсіювання акустичних хвиль на сукупності включень малого радіуса, не розв'язуючи при цьому систему інтегральних рівнянь для знаходження розподілу акустичного поля на поверхні включень. На основі методу розроблено конструктивний алгоритм формування середовища із бажаним коефіцієнтом рефракції.
4. Із використанням тривимірної моделі розсіювання електромагнітних хвиль у середовищі з розміщеними у ньому безмежно тонкими ідеально провідними циліндрами, вперше розроблено методи розрахунку і оптимізації коефіцієнта рефракції такого середовища. На основі асимптотичного розв'язку задачі отримано рівняння типу Шредінгера для розсіяного поля, коефіцієнт при функції у якому визначає коефіцієнт рефракції результуючого середовища.
5. Вперше розроблено метод розв'язання задачі електромагнітного розсіювання для неоднорідного середовища із сукупністю імпедансних включень малого розміру. Розв'язок задачі отримано у вигляді суми відомих базисних функцій з невідомими коефіцієнтами при функції Гріна вільного простору та її похідній. Отримано явну формулу для магнітної проникності такого неоднорідного середовища. На основі методу розроблено алгоритм, який дозволяє формувати середовище із кусково-постійною магнітною проникністю.

6. Вдосконалено існуючі математичні моделі аналізу плоских антенних решіток за рахунок ведення спеціальної системи координат у дальній зоні, що дало змогу забезпечити розділення змінних і тим самим перейти від тривимірної задачі аналізу до задач аналізу у двох ортогональних площинах, і внаслідок чого у значній мірі скоротити час розв'язання відповідних оптимізаційних задач за заданими амплітудними характеристиками у широкому діапазоні частот.
7. Із врахуванням векторного характеру електромагнітного поля і суттєвої тривимірності системи вдосконалено математичну модель хвилеводної решітки, що дало змогу врахувати взаємовплив окремих хвилеводів у процесі розв'язання прямої електродинамічної задачі. Узагальнено постановку задачі синтезу решітки за заданою амплітудною ДС шляхом врахування обмежень на значення поля в заданих областях ближньої зони, що дало змогу задовольняти вимоги електромагнітної сумісності. Для розв'язання задачі синтезу розроблено збіжні ітераційні методи.
8. Набув подальшого розвитку метод Ньютона для знаходження розв'язків нелінійних рівнянь типу Гаммерштейна та дослідження їхніх кількісних і якісних характеристик; в розвинутому методі обмеження на норму шуканої функції і на приріст характерного параметра в ядрі рівняння забезпечує одержання розв'язку з фіксованою фазовою ДС у широкому діапазоні значень цього параметра, що дало змогу розширити множину розв'язків задач синтезу конкретних випромінюючих систем.

Практичне значення одержаних результатів. На основі отриманих теоретичних результатів та розроблених числових методів створено алгоритми та програмне забезпечення для розв'язання низки прикладних задач:

1. Програмний комплекс, розроблений для розв'язування задач амплітудно-фазового та фазового синтезу плоскої криволінійної замкнутої антени та лінійної антенної ґратки, дозволяє знайти всі існуючі розв'язки і вибрати серед них той, що найкраще задовольняє поставленим вимогам. Розроблені на основі модифікованого методу Ньютона числові методи і алгоритми дають можливість проводити дослідження кількісних та якісних характеристик нелінійних інтегральних та матричних рівнянь широкого класу.
2. Розроблені та обґрунтовані математичні моделі і числові та аналітико-числові методи розв'язування задач синтезу за амплітудною та енергетичною ДС для лінійної хвилеводної решітки та плоскої решітки з гексагональним розміщенням елементів використано на етапі проектування гібридних антенних систем.
3. Із використанням розробленого прикладного програмного забезпечення проведено оптимізацію геометрії мікросмужкової системи з метою отримання параметрів матриці розсіювання, які забезпечують максимальне значення коефіцієнта передачі радіочастотного спектрометра стоячих хвиль. Одержані на основі числових розрахунків оптимізовані параметри мікросмужкової структури використано при розв'язанні задачі синтезу для антенної решітки з таких структур.

4. На основі розробленого методу розв'язування задачі розсіювання акустичних хвиль на сукупності включень малого радіуса створено програмне забезпечення для моделювання середовищ із заданим чи близьким до заданого коефіцієнтом рефракції. Чисельно встановлено, що формування заданого коефіцієнта рефракції відбувається з найбільшою точністю в частотному діапазоні 30-100 МГц.
5. Запропонований асимптотичний підхід використано для дослідження характеристик зворотного розсіювання середовищем, яке містить включення невеликого (порівняно з довжиною хвилі) розміру. Розроблено комплекс програм для розрахунку ДС зворотного розсіювання. На основі проведених обчислювальних експериментів одержано сукупність даних, які характеризують ДС зворотного розсіювання для різноманітних геометричних і фізичних параметрів об'єкта розсіювання. Розроблений комплекс програм і одержані результати можуть бути основою для програмного засобу автоматизованого неруйнівного контролю.
6. Розроблене прикладне програмне забезпечення використано для моделювання і розрахунку параметрів електромагнітних середовищ із заданим коефіцієнтом рефракції. Визначено фізичні параметри середовища із заданим (або близьким до заданого) значенням цього коефіцієнта, включаючи від'ємні.
7. Запропонований метод і розроблені алгоритми розв'язання задачі електромагнітного розсіювання на сукупності імпедансних включень малого розміру дозволили формувати неоднорідні середовища із заданою магнітною проникністю, яка відрізняється від початкової в межах 10% – 30%. Створений програмний комплекс дав можливість визначити конструктивні параметри середовища (поверхневий імпеданс включень, їхній розмір та порядок розміщення), які забезпечують створення заданої магнітної проникності.

Результати роботи використано:

- в КБ Південне ім. М. К. Янгеля при розрахунку і оптимізації параметрів дзеркальних антен НВЧ діапазону з контурною ДС при виконанні ДКР “Либідь” – “Єдина космічна система зв'язку багатофункціонального призначення з використанням геостаціонарних космічних апаратів фіксованого та рухомого зв'язку, телебачення і радіомовлення”;
- в Лабораторії надвисоких частот і характеристик Інституту мікроелектроніки електромагнетизму і фотоніки (Laboratoire d'Hyperfrequences et de Characterization, Institut de Microelectronique, Electromagnetisme et Photonique) (м. Гренобль, Франція) при розробці радіочастотного спектрометра стоячих хвиль;
- в Лабораторії прикладної електродинаміки (Laboratory of Applied Electrodynamics) та в Лабораторії Електромагнітного супроводу і програмного забезпечення (Laboratory EM Consulting and Software) (м. Тбілісі, Грузія) у процесі моделювання і розробки автомобільних антен;
- в навчальному процесі Національного університету “Львівська політехніка” при викладанні дисципліни “Методи синтезу і оптимізації”.

Особистий внесок здобувача. Усі теоретичні та практичні результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи і виносяться на захист, одержані автором самостійно та опубліковані в монографії [1], де автору належить розробка методології математичного моделювання плоских випромінюючих систем та розробка і обґрунтування числових методів розв'язання задач синтезу за заданою амплітудною ДС; двох розділах колективних монографій [10, 11], де автор розробив збіжні числові методи розв'язування задач синтезу плоских дискретних випромінюючих систем і оптимізації параметрів неоднорідних формуючих середовищ; 20 одноосібних наукових працях та в 39 працях, опублікованих у співавторстві. У працях, написаних у співавторстві, автору належить: розробка математичної моделі задачі акустичного розсіювання на сукупності включень малого розміру [2, 36, 53], застосування розробленої моделі до формулювання задачі зворотного розсіювання в акустичному неоднорідному середовищі та розробці методів її розв'язання [20, 58]; розробка математичної моделі і методів розв'язання задачі електромагнітного розсіювання на сукупності включень малого розміру [3, 5, 6, 22, 40] та перевірка її адекватності [4]; розробка загального підходу до математичного моделювання плоских дискретних випромінюючих [7-9, 29, 30, 39, 41, 59] і хвилеводних [13, 14, 21, 32] систем, розробка методів розв'язання задач синтезу для таких систем у частотному діапазоні [35, 38, 55], розробка методів розв'язання задач синтезу з додатковими вимогами до випромінюючих систем [42, 43, 46-48, 60]; розробка обчислювальної схеми модифікованого методу Ньютона [26] та модифікація розроблених алгоритмів для задач амплітудно-фазового синтезу плоскої кільцевої випромінюючої системи [52]; розробка алгоритмів для розв'язання задачі синтезу лінійних неперервних і дискретних випромінюючих систем при використанні поліноміального представлення розв'язків задачі [28, 61]; розробка тривимірної векторної математичної моделі та методу розв'язування прямої електродинамічної задачі мікросмушкової неоднорідності [49], методів і обчислювальних алгоритмів для розв'язання задач оптимізації її геометричних параметрів [51]; розробка алгоритму і обчислювальної процедури розв'язання задачі трансформування електромагнітного поля у регулярному хвилеводі [50].

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися на міжнародних та всеукраїнських симпозиумах, конференціях та семінарах, зокрема, на: “Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (ММЕТ)” – м. Харків (2000, 2006, 2012), м. Київ (2002, 2010), м. Дніпропетровськ (2004, 2014), м. Одеса (2008); “Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)” – м. Львів (2007, 2009, 2013), м. Тбілісі (2004, 2008, 2014); “3rd World Multiconference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC-99)” – м. Афіни (1999); “International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)” – м. Севастополь (1999, 2003, 2007), м. Київ (2005), м. Львів (2009), м. Одеса (2013); “Millennium Conference on Antennas & Propagation (AP-2000)” – м. Давос, Швейцарія (2000); “International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON)” – м. Вроцлав (2000), м. Вільнюс (2010),

м. Гданськ (2014); “International Symposium on Theoretical Electrical Engineering (ISTET)” – м. Лінц, Австрія (2001), м. Львів (2005); “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)” – м. Львів (2003, 2005, 2007, 2009, 2013, 2015); “International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Systems (TCSET)” – м. Славськ, (2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014); “International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS)” – м. Севастополь (2004, 2006); “International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)” – м. Львів (2006, 2008, 2010, 2014); “1st European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP-2006)” – м. Ніцца, Франція (2006); “Modern Problems of Mechanics and Mathematics (MPMM)” – м. Львів (2008); “2011 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (IEEE APWC-11)” – м. Турин, Італія (2011); “2011 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA-11)” – м. Турин, Італія (2011).

Результати роботи доповідалися на щорічних семінарах товариств Electron Devices (м. Мадрид, травень 2004 р.) та Antennas and Propagation (м. Вашингтон, червень 2005 р.) Міжнародного інституту інженерів електрики і електроніки (IEEE); науковому семінарі Лабораторії надвисоких частот і характеристик Інституту мікроелектроніки, електромагнетизму і фотоніки (Laboratoire d’Hyperfréquences et de Caractérisation, Institut de Microelectronique, Electromagnetisme et Photonique) (м. Гренобль, Франція, вересень 2010 р.).

У цілому робота доповідалася на наукових семінарах відділу числових методів математичної фізики Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України (керівник – д.ф.-м.н., проф. М.М.Войтович), кафедри систем автоматизованого проектування Національного університету “Львівська політехніка” (керівник – д.т.н., проф. М.В.Лобур), кафедри теоретичних основ радіотехніки Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” (керівник – д.т.н., проф. Ф.Ф.Дубровка) та кафедри інформатики і прикладної математики Рівненського державного гуманітарного університету (керівник – д.т.н., проф. А.Я.Бомба).

Публікації. Результати роботи опубліковано в одній спільній монографії [1], двох розділах колективних монографій [10, 11], у 25 статтях у наукових журналах і збірниках наукових праць [2-9, 12-28] (зокрема, 11 одноосібних) та 34 у матеріалах міжнародних наукових конференцій. Серед них 16 статей опубліковано у наукових фахових виданнях України та 8 – у закордонних журналах, які включені до міжнародних наукометричних баз, зокрема, Scopus, ISI, SCI, IET, Zentrblatt, Engineering Village, Compendex, ResearchGate, IEEE Xplore та ін.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, восьми розділів і висновків, викладених на 312 сторінках та ілюстрованих 120 рисунками і 17 таблицями, списку використаних джерел із 348 найменувань на 37 стор. та додатку. Загальний обсяг роботи 354 стор.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання дослідження, висвітлено наукову новизну та практичну значимість одержаних результатів. Наведено відомості про апробацію роботи та публікації.

У **першому розділі** на основі використання аналізу існуючих публікацій проаналізовано стан розвитку математичного моделювання випромінюючих систем та формуючих середовищ, визначено проблеми, які вимагають вирішення, обґрунтовано вибрані підходи розв'язання прямих та обернених задач теорії синтезу випромінюючих систем та оптимізації характеристик формуючих середовищ.

Перші роботи, присвячені задачам синтезу випромінюючих систем, з'явилися у 30-х роках минулого століття. Починаючи з того часу, побудові та дослідженню математичних моделей випромінюючих систем різних типів, розробці аналітичних, аналітико-числових та числових методів розв'язування задач синтезу присвячена велика кількість робіт. Серед цих робіт у першу чергу слід відмітити монографії Б. М. Мінковича й В. П. Яковлева, Л. Д. Бахраха й С. Д. Кременецького, Є. Г. Зелкіна й В. Г. Соколова, Я. С. Шифріна, Д. І. Воскресенського, Б. З. Каценеленбаума, В. П. Кравченка, С. Balanis, W. L. Stutzman, G. A. Thiele, J. L. Volakis та ін., а також оглядові праці Б. Є. Кінбера, В. І. Классена, А. С. Ільїнського, Я. С. Шифріна та ін. Аналіз цих та багатьох інших робіт свідчить, що на перших етапах найбільша увага приділялась задачам синтезу антен та випромінюючих систем за заданою повною (комплексною) ДС. Такі задачі дістали в літературі назву класичних.

У зв'язку з необхідністю проектування широкого класу випромінюючих систем на основі неповних даних, значна увага приділяється задачам синтезу за заданою амплітудною ДС. Першими роботами у цьому напрямку були роботи Ю. І. Чоні, А. В. Чечкіна, В. М. Димського, А. Г. Рамма, В. В. Семенова. Аналітико-числові та числові методи розв'язування цього класу задач розвинуті у роботах В. І. Дмитрієва, Н. І. Березіної, А. В. Чечкіна, J. R. Mautt, R. F. Harrington, R. J. Marhefka, E. I. Pelton, R. Ansari, R. Mittra, G. T. Poulsen. Ці методи використовували відповідні ітераційні процедури, які дозволяли отримати один із розв'язків задачі.

Інтегральні рівняння, які виникають при варіаційному формулюванні задач синтезу за заданою амплітудною ДС, є нелінійними інтегральними рівняннями типу Гаммерштейна і можуть мати неєдиний розв'язок. Дослідженню питань кількості розв'язків нелінійних інтегральних рівнянь і їхніх властивостей присвячені роботи М. М. Войтовича, П. О. Савенка. Теоретичним питанням існування розв'язків цих нелінійних інтегральних рівнянь, дослідженню їхніх спектральних властивостей та залежності від початкових даних задачі, присвячені роботи Б. М. Подлевського, Ю. П. Тополюка. Питанням поліноміального представлення розв'язків нелінійних інтегральних рівнянь типу Гаммерштейна присвячені роботи М. М. Войтовича й О. О. Булацик.

Значна частина робіт у галузі синтезу випромінюючих систем присвячена задачам конструктивного синтезу. Характерною властивістю цих задач є те, що

на основі вимог до розподілу поля в дальній чи середній зонах випромінюючої системи синтезуються конструктивні параметри системи. Серед таких параметрів розглядається поверхневий імпеданс, форма поверхні антени і функція прозорості частини цієї поверхні та ін. Цим питанням присвячені роботи Б. З. Каценеленбаума, О. Н. Сівова, А. Д. Шатрова, Є. І. Коршунової, А. Ф. Чапліна, Р. І. Clarricoats, Р. К. Saha. Проблемам, у яких обґрунтовується та досліджується врахування різноманітних детермінованих і випадкових похибок присвячені роботи Я. С. Шифріна, Л.Г. Корнієнка, Ф. Л. Айзіна, J. Ruze, які зумовили розвиток так званої статистичної теорії синтезу антен.

У зв'язку з тенденцією мікромініатюризації пристроїв сучасної радіоелектроніки надвисокочастотного (НВЧ) діапазону значне поширення отримали мікросмужкові випромінюючі та хвилеводні системи. Суттєва увага в цій області у зв'язку із врахуванням взаємодії окремих конструктивних елементів з метою побудови найбільш адекватної електродинамічної моделі системи (розв'язку прямої задачі – задачі аналізу) приділяється у роботах А. С. Ільїнського, А. Т. Фіалковського, Є. І. Нефедова, Б. А. Панченка, С. Л. Просвірніна, D. M. Pozar, A. J. Parfitt, D. W. Griffin, P. H. Cole, розробці числових методів розв'язування задачі аналізу (А. Ф. Чаплін, П. О. Савенко), та оптимізації параметрів систем з метою формування заданих характеристик випромінювання (Ф. Ф. Дубровка, D. Davidson, Y.-R. Samii).

Значна увага в процесі розв'язання задач формування середовищ із заданими електромагнітними чи акустичними властивостями приділяється формулюванню і розробці методу розв'язання прямих електродинамічної та акустичної задач. Серед робіт присвячених цій проблематиці слід відмітити роботи Я. Н. Фельда, Б. З. Каценеленбаума, А. G. Ramm. За рахунок вміщення в початкове однорідне середовище включень з певними властивостями, результуюче середовища набуває специфічних електродинамічних чи акустичних характеристик, зокрема, змінюється його коефіцієнт рефракції чи магнітна проникність. Такі роботи в останні десятиріччя привертають значну увагу багатьох дослідників у зв'язку зі створенням на такій основі так званих кіральних середовищ і матеріалів (С. Л. Просвірнін, С. М. Третьяков, А. Sihvola, G. Kristensson, M. Notomi).

Проте, аналіз стану побудови математичних моделей та розвитку методів розв'язання нелінійних задач синтезу випромінюючих і хвилеводних систем та оптимізації параметрів формуючих середовищ вказує на відсутність повноти досліджень у цій галузі, що пов'язане насамперед із значною складністю таких задач. У багатьох роботах, присвячених розв'язанню цього класу задач, питання неєдиності розв'язків, їхніх властивостей, знаходження розв'язку, який у повній мірі задовольняє сформульований критерій, не досліджувались.

У **другому розділі** наведено фундаментальні положення, які використовуються при побудові математичних моделей випромінюючих систем та формуючих середовищ. Математичні моделі ґрунтуються на рівняннях Максвелла і відповідних граничних задачах математичної фізики. Розглянуто характеристики випромінювання системи, розміщеної в обмеженій області однорідного ізотропного середовища. Наведено розв'язки задач аналізу у

операторному вигляді, які пов'язують ДС даної системи з розподілом струмів (полів) у елементах випромінюючої системи і в подальшому використовуються у формулюваннях обернених задач (задач синтезу).

Сформульовано варіаційні постановки оптимізаційних задач, наведено основні нелінійні рівняння. Визначено основний напрямок наукових досліджень та окреслено аналітико-числові й числові методи, які будуть застосовуватися при розв'язанні як прямих, так і обернених задач.

Зв'язок між розподілом струмів (полів) u в елементах системи та породженою ним ДС f записується у вигляді

$$f = Au. \quad (1)$$

У подальшому, вигляд і властивості оператора A визначаються типом і геометрією конкретної випромінюючої системи.

Задача синтезу за заданою амплітудною ДС F ($F \geq 0$) формулюється як задача мінімізації функціонала

$$\sigma(u) = \|F - |f|\|_f^2 \equiv (F - |Au|, F - |Au|)_f, \quad (2)$$

де $(\cdot, \cdot)_f$ та $\|\cdot\|_f^2$ – скалярний добуток у просторі ДС та породжена ним норма. У випадку, коли оператор A не ізометричний (тобто, відсутня рівність Парсевалю $\|Au\|_f^2 = \|u\|_u^2$), функціонал (2) має бути доповнений доданком $\alpha \|u\|^2$, який описує обмеження на норму струму.

В задачах синтезу за заданою енергетичною ДС використовується функціонал

$$\sigma_\alpha(u) = (F^2 - |Au|^2, F^2 - |Au|^2)_f + \alpha \|u\|^2. \quad (3)$$

У конкретних задачах мінімізація функціоналу (2) або (3) здійснюється безпосередньо числовими (наприклад, градієнтними) методами, або шляхом зведення його до відповідного рівняння Ейлера. В останньому випадку це рівняння для функціоналу (2) має вигляд

$$u = A^*(Fe^{i \arg Au}), \quad (4)$$

або еквівалентне йому

$$f = AA^*(Fe^{i \arg f}). \quad (5)$$

Тут A^* – оператор, спряжений до A :

$$(f, Au)_{H_f} = (A^*f, u)_{H_u}. \quad (6)$$

Аналогічні рівняння для функціоналу (3) мають вигляд:

$$u = \frac{2}{\alpha} [A^*(F^2 \cdot Au) - A^*(|Au|^2 \cdot Au)], \quad (7)$$

$$f = \frac{2}{\alpha} [AA^*(F^2 \cdot f) - AA^*(|f|^2 \cdot f)]. \quad (8)$$

Задачі формування середовищ із заданими електромагнітними чи акустичними властивостями вимагають векторної постановки задачі розсіювання, знаходження її розв'язку в явному вигляді та подальшого визначення параметрів результуючого середовища. Таке середовище формується у результаті включення у певну обмежену область великої

кількості тіл малого розміру, що в загальному забезпечує реалізацію бажаних властивостей результуючого середовища.

Пряма акустична задача розглядається на сукупності включень малого розміру, які містяться у деякій скінченній області в \mathbb{R}^3 . На границі включень задано граничні умови імпедансного типу. Компоненти падаючого поля задовольняють рівнянню Гельмгольца в \mathbb{R}^3 , а компоненти розсіяного поля – умови випромінювання. Повне поле є сумою падаючого і розсіяного полів

$$u(x) = u_0(x) + \sum_{m=1}^M \int_{S_m} G(x, y) \sigma_m(y) dy, \quad (9)$$

тут $u_0(x)$ – падаюче поле, $G(x, y)$ – функція Гріна вільного простору, $\sigma_m(y)$ – допоміжна величина, яка визначається явно у випадку одного включення і з відповідної системи лінійних рівнянь у випадку багатьох включень. Результуюче середовище із сукупністю багатьох включень малого розміру має коефіцієнт рефракції, відмінний від коефіцієнта рефракції початкового середовища.

У розділі наведено загальні підходи та принципи побудови математичних моделей для різних типів випромінюючих систем і формуючих середовищ, висвітлено особливості розв'язання задач синтезу за амплітудною та енергетичною ДС і сформульовано основні напрямки дисертаційних досліджень.

У **третьому розділі** розглянуто задачі синтезу різного типу антен за заданою амплітудною та енергетичною ДС. Задачі об'єднані модифікованим методом Ньютона, який використовується для розв'язання нелінійних рівнянь, що там виникають.

У першому підрозділі описано загальну схему методу. Нелінійне рівняння синтезу, яке необхідно розв'язати, у загальному вигляді записано таким чином

$$\Phi(f, c) = 0, \quad (10)$$

де Φ – нелінійна оператор-функція, f – невідома комплексна функція, c – дійсний параметр. Якщо пара (f_n, c_n) є n -м наближенням до шуканої точки на гілці розв'язків, то наступне $n+1$ -е наближення знаходиться з умови, щоб рівняння (10) задовольнялося в першому порядку за приростами $\varepsilon = c_{n+1} - c_n$ і $\delta = f_{n+1} - f_n$. Ця вимога приводить до рівняння

$$\Phi_c \cdot \varepsilon + \Phi_f(f_n, c_n, \delta) = -\Phi_n, \quad (11)$$

де

$$\Phi_c = \left. \frac{\partial \Phi}{\partial c} \right|_{c=c_n}, \quad (12)$$

причому $\Phi_f(f_0, c_0, \delta)$ визначається із співвідношення

$$\Phi(f, c) = \Phi_n + \Phi_c \cdot \varepsilon + \Phi_f(f_n, c_n, \delta) + o(\varepsilon, \delta), \quad (13)$$

а $\Phi_n = \Phi_f(f_n, c_n)$. Рівняння (11) лінійне відносно ε та δ .

Другий підрозділ присвячений застосуванню цієї модифікації методу до задачі амплітудно-фазового синтезу за заданою амплітудною ДС для

неперервної замкнутої антени. В якості критерію оптимізації використовується функціонал (2) з доданком $\alpha \|u\|^2$. Рівняння Ейлера для нього має вигляд

$$\alpha f(\varphi) = -2\pi a \int_0^{2\pi} J_0(2ka \sin \frac{\varphi - \varphi_1}{2}) [f(\varphi_1) - F(\varphi_1) e^{i \arg f(\varphi_1)}] d\varphi_1. \quad (14)$$

Раніше ця задача розв'язувалася безпосередньо ітераційним методом, який давав можливість знайти лише один розв'язок. Застосування модифікованого методу Ньютона до рівняння (14) дозволило встановити існування розв'язків, в яких ДС мають різні властивості за фазою. Синтезована фазова ДС може бути: постійною (дійсний синфазний струм на антені), непарною за кутом (дійсний несиметричний струм з переходом через нуль), парною (комплексний симетричний за кутом струм); ці результати наведено у третьому підрозділі.

У четвертому підрозділі розглянуто застосування модифікованого методу Ньютона до задач фазового синтезу лінійної еквідістантної антенної ґратки за заданою амплітудною ДС. В цій задачі заданими є бажана амплітудна ДС F , а також амплітудний розподіл струму $U = \{|u_n|\}$ на елементах ґратки.

Критерієм оптимізації є функціонал:

$$\chi(\psi) = (|A(|u| e^{i\psi})|, F)_f, \quad (15)$$

який підлягає максимізації. Оператор A обчислення ДС за струмами $\{u_n\}$ має вигляд

$$Au = \sqrt{\frac{c}{2\pi}} \sum_{n=-M}^M u_n e^{icn\xi}, \quad (16)$$

де $\psi_n = \arg u_n$, $c = kd \sin \theta_0$, d – відстань між випромінювачами, $\xi = \sin \theta / \sin \theta_0$ – узагальнена кутова координата, $2\theta_0$ – кут, у межах якого задана амплітудна ДС F відмінна від нуля. Невідомими величинами є фази струмів $\{\psi_n\}$, $(-M \leq n \leq M)$.

Рівняння Ейлера для функціоналу (15) мають вигляд

$$f - A[Ue^{i \arg w}] = 0, \quad (17)$$

$$w - A^*[Fe^{i \arg f}] = 0, \quad (18)$$

де f – синтезована ДС, w – допоміжна функція.

Результати числових розрахунків, одержані модифікованим методом Ньютона, показують, що в різних діапазонах значень параметра c максимальні значення функціоналу (15) досягаються, відповідно, на розв'язках з нульовою, непарною або парною синтезованими фазовими ДС.

У п'ятому підрозділі розглянуто задачу синтезу лінійної антени за заданою енергетичною ДС F^2 у варіаційній постановці (3). Рівняння Ейлера для цього функціонала відносно струму u та ДС f мають вигляд (7) і (8). З аналізу рівняння (8) випливає, що при довільних значеннях параметрів задачі існує тривіальний розв'язок цього рівняння $f \equiv 0$. Щоб позбутися таких розв'язків, функціонал (3) доповнюється додатковою умовою

$$\|f\|^2 = \|F\|^2. \quad (19)$$

Із використанням методу множників Лагранжа задача (3), (19) зводиться до мінімізації функціоналу

$$\sigma_{\alpha,\mu}(u) = \|F^2 - |f|^2\|_f^2 + \alpha \|u\|_u^2 - \mu \|f\|_f^2, \quad (20)$$

для якого рівняння Ейлера має вигляд

$$\alpha f = 2AA^*[(F^2 - |f|^2)f] + \mu AA^* f. \quad (21)$$

Рівняння (21) та (19) розглядаються як система рівнянь відносно функції f і параметра μ .

Запропонований підхід використано для розв'язання задачі синтезу лінійної антени за заданою енергетичною ДС. На рис. 1 показано одержану залежність середньоквадратичного відхилення $\sigma_0 = \|F^2 - |f|^2\|_f^2$ енергетичних ДС від параметра $c = ka \sin \theta_0$ для різних розв'язків рівняння (21) при двох заданих ДС $F^2(\xi)$; тут $2a$ – довжина антени, $2\theta_0$ – кут, в межах якого F^2 відмінна від нуля. При всіх значеннях c існують дійсні розв'язки (штрихові лінії на рисунках). Зі збільшенням параметра c спотерігаються галуження розв'язків різних типів: як дійсних у комплексні (точки c_{11}, c_{21}, c_{31}), так і комплексних в нові комплексні (точки c_{12}, c_{22}, c_{32}).

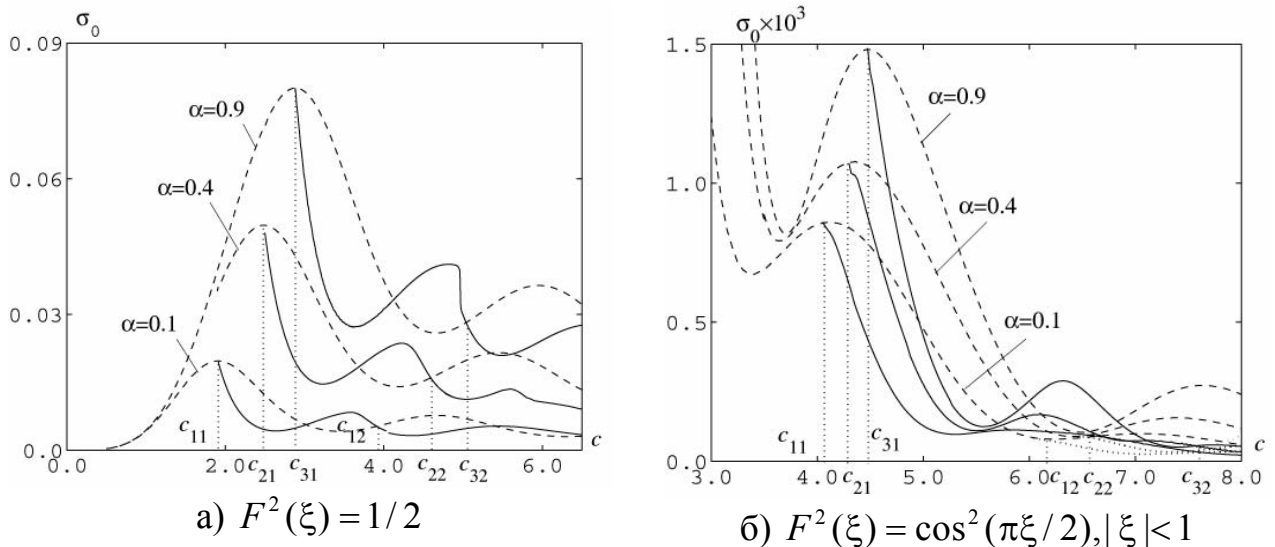


Рис. 1. Середньоквадратичне відхилення енергетичних ДС для різних розв'язків рівняння (21)

Рівняння (21) можна розв'язувати із застосуванням концепції породжуючих поліномів, у якій фазова ДС подається у вигляді $e^{i \arg f} = P_N / |P_N|$, де P_N – поліном невеликого степеня. Корені цього полінома разом з функцію $|f|$ визначають із відповідної системи інтегро-трансцендентних рівнянь. Результати, одержані цим методом, повністю узгоджуються із приведеними вище. Крім того, знайдено нові розв'язки, які методом Ньютона одержати не вдалось.

У четвертому розділі розглянуто тривимірну математичну модель лінійної решітки із хвилеводним збудженням (рис. 2). ДС цієї системи має вигляд

$$f(\xi) = \sum_{m=1}^M a_m f_m(\xi), \quad (22)$$

де $f_m(\xi)$ – ДС окремих хвилеводів, ξ – як і в (17), узагальнена кутова координата,

$$f_m(\xi) = \sum_{j=1}^M e^{ik_j d \xi} \int_{-l/2}^{l/2} U_j^{(m)}(\zeta) e^{ik \xi \zeta} d\zeta, \quad (23)$$

$\mathbf{a} = \{a_m, m = 1, \dots, M\}$ – вектор комплексних коефіцієнтів збудження окремих хвилеводів, $U_j^{(m)}$ – величина струму в апертурі j -го хвилевода за умови, що m -й хвилевод збуджений нормальною хвилею з одиничною амплітудою, а всі інші хвилеводи не збуджені. Струми $U_j^{(m)}$ визначають у процесі розв'язання прямої задачі (задачі аналізу).

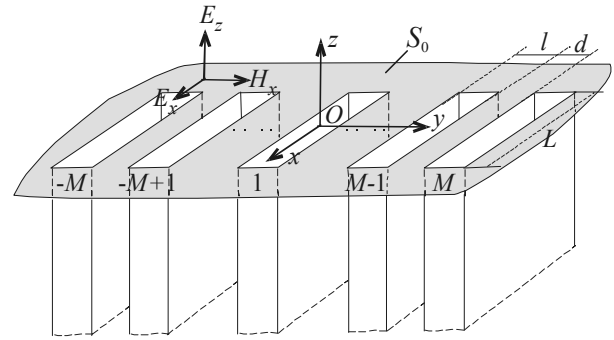


Рис. 2. Геометрія хвилеводної решітки

У задачі синтезу коефіцієнти a_m визначають із умови мінімуму функціоналу

$$\sigma = \int_{-1}^1 (F(\xi) - |f(\xi)|)^2 d\xi + \sum_{i=1}^K p_i(S_i) |u_i(S_i)|^2 dS_i + \alpha \sum_{m=1}^M |a_m|^2. \quad (24)$$

Тут $u_i(S_i)$ – значення поля у заданих точках ближньої зони S_i , $p_i(S_i)$ – вагові коефіцієнти. Значення поля u_i за коефіцієнтами a_m визначаються дією операторів B_i :

$$B_i \mathbf{a} = \sum_{m=1}^M a_m \Phi_m(S_i), \quad (25)$$

де

$$\Phi_m(S_i) = \int_{-l/2}^{l/2} \sum_{j=1}^M U_j^{(m)}(\xi) G_0(x_i, z_i, \xi + (j-1)d) d\xi, \quad (26)$$

а $G_0(x_i, z_i, \xi + (j-1)d)$ – функція Гріна півпростору, (x_i, z_i) – координати точки S_i , d – відстань між окремими хвилеводами.

Така постановка варіаційної задачі дозволяє враховувати обмеження на значення поля в заданих точках ближньої зони, наприклад, задовольняти вимоги електромагнітної сумісності.

Система рівнянь Ейлера для функціоналу (24) має вигляд

$$\alpha a_m + A_m^* [p(\xi)(f(\xi) - F(\xi) \exp(i \arg f(\xi))) + \sum_{i=1}^K B_m^* [p_i u_i(x, y)]] = 0, \quad m = 1, 2, \dots, N. \quad (27)$$

Ця система розв'язується методом послідовних наближень:

$$\alpha a_m^{(k+1)} + A_m^* (p f^{(k+1)}) + \sum_{i=1}^K B_m^* (p_i u_i^{(k+1)}) = A_m^* (p F \exp(i \arg f^{(k)})), \quad k = 1, 2, \dots, \quad (28)$$

який володіє релаксаційною властивістю, тобто на кожному його кроці значення функціонала (24) зменшується.

В підрозділі 4.5 розроблено алгоритм розв'язання задачі перетворення електромагнітних полів у регулярному хвилеводі з використанням фазових коректорів. Варіаційна постановка задачі забезпечує, зокрема, можливість наближеного перетворення однієї власної моди в іншу.

П'ятий розділ присвячений використанню енергетичного критерію (3) в задачах синтезу плоских антенних решіток. Одержано основні співвідношення для задачі амплітудно-фазового синтезу у випадку прямокутної решітки і решітки із гексагональним розміщенням елементів. З метою спрощення теоретичного дослідження процесу галуження (біфуркації) розв'язків задачі, доповнення цього критерію додатковою умовою (19) не використовувалось.

Задача формулюється у варіаційній постановці (3). Нелінійне рівняння Ейлера для цього функціоналу має вигляд (8) і, як вказувалось раніше, має, зокрема, нульовий розв'язок. Для дослідження загальної кількості його розв'язків і їхніх властивостей використовується відповідне лінійне рівняння, що дає можливість дослідити появу ненульових розв'язків, які відгалужуються від нульового.

Задача про знаходження ліній галуження зводиться до відповідної задачі

$$\alpha f = 2AA^*(F^2 f) \quad (29)$$

на власні значення, яка є лінійною за невідомою функцією f і нелінійною двопараметричною за спектральним параметром (ядро оператора AA^* залежить від двох параметрів c_1, c_2 з огляду на двовимірність рівняння).

Для визначення точок галуження на площині (c_1, c_2) використовується метод неявних функцій з переходом до відповідної задачі Коші. Для деяких функцій F область появи ненульових розв'язків знайдено наближено без розв'язування спектральної задачі.

Проведені дослідження вказують на існування розв'язків нелінійного рівняння (8) з різними фазовими властивостями синтезованої ДС. Як правило, розв'язки з несиметричною фазовою ДС $\arg f$ надають меншого значення функціоналу, ніж розв'язки з постійною і симетричною фазовими ДС.

На основі числових розрахунків встановлено оптимальні значення параметра α і додаткового параметра $\beta \in [0, 1]$, що використовується для прискорення збіжності ітераційного процесу, для яких збіжність ітераційного

процесу розв'язування рівняння (8) є найкращою. На рис. 3 і рис. 4 наведено результати одержані для випадку заданої енергетичної ДС $F^2 \equiv 1$ для прямокутної решітки із 121 випромінювачем. При збільшенні параметра α кількість ітерацій, необхідних для досягнення заданої точності, зростає, а збільшення параметра β покращує збіжність ітераційного процесу.

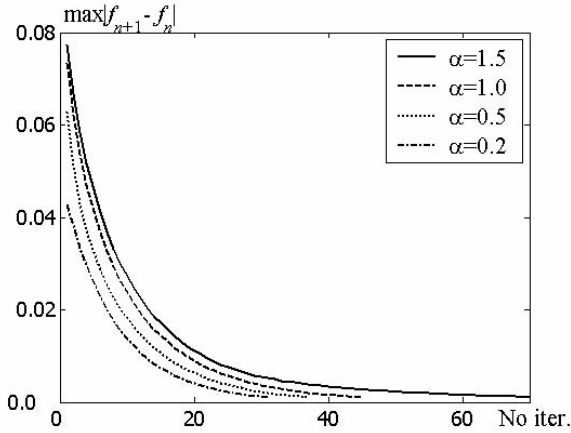


Рис. 3. Збіжність ітераційного процесу при різних α , $\beta = 0.1$

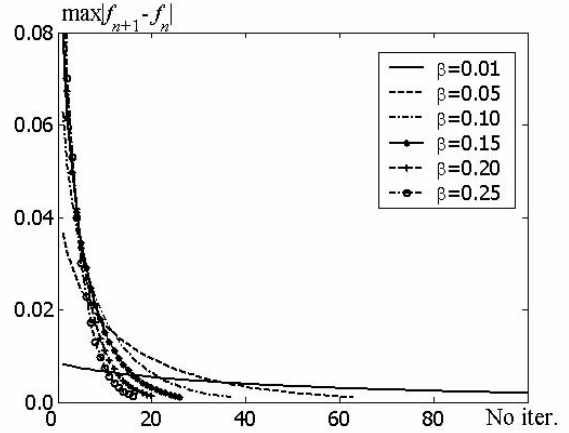


Рис. 4. Збіжність ітераційного процесу при різних β , $\alpha = 0.5$

У розділі наведено також результати розрахунку і оптимізації параметрів решіток, які використовуються у конкретних інженерних застосуваннях. Результати синтезу сумарної і різницевої ДС для двох розглянутих типів решіток показують, що вже при невеликій кількості випромінювачів (≤ 130) синтезовані енергетичні ДС відхиляються від заданих в області головної пелюстки не більше, ніж на 3 дБ, а рівень бокових пелюсток не перевищує -35 дБ. На рис. 5 і рис. 6 наведено результати синтезу для гексагональної решітки з 127 випромінювачів.

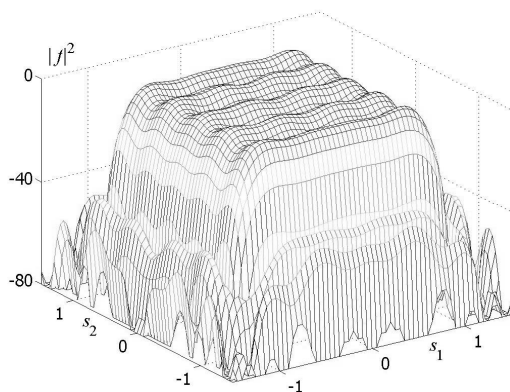


Рис. 5. Синтезована сумарна енергетична ДС, $c_1 = 2.0, c_2 = 2.236$

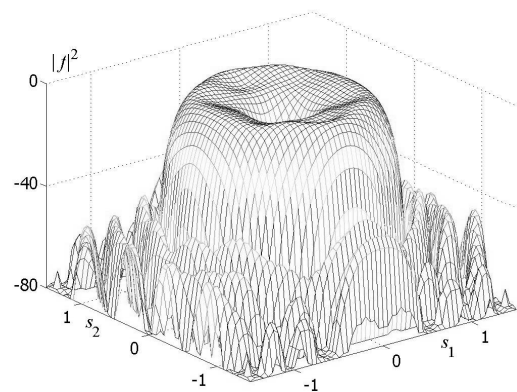


Рис. 6. Синтезована різницева енергетична ДС, $c_1 = 2.0, c_2 = 2.236$

Як і у випадку лінійної антенної решітки, нові знайдені розв'язки з непарною фазовою ДС по двох координатах у площині решітки є кращими на 25% - 30% у межах прийнятого критерію (значення функціоналу σ_α) у порівнянні з розв'язками, що мають постійну (нульову) або парну фазу.

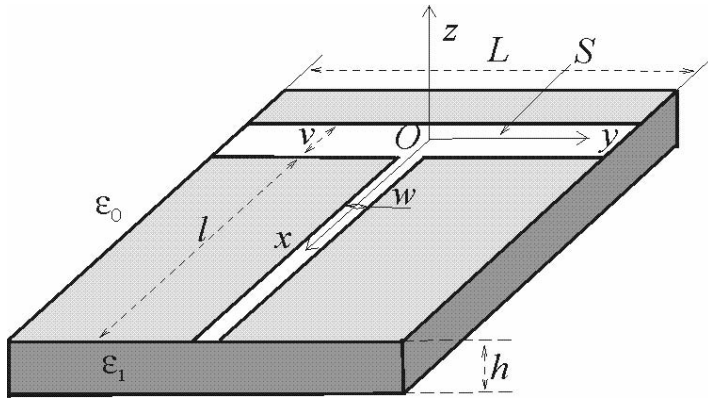


Рис. 7. Геометрія мікросмушкового елемента

Шостий розділ присвячено формулюванню та розв'язанню оптимізаційних задач, які виникають при моделюванні і розрахунках мікросмушкових елементів (рис. 7). Такі елементи використовуються як складова частина багатьох випромінюючих систем. Співвідношення геометричних розмірів: $l \sim (10 \div 15)w$, $L, v \sim 0.5l$, $h = (3 \div 5)w$.

Для опису характеристик системи в цілому, розроблено векторну електродинамічну модель мікросмушкового елемента. Компоненти електромагнітного поля в околі мікросмушкового елемента задовольняють рівняння Максвелла, на його поверхні – відповідні граничні умови і умови випромінювання на безмежності. Використовуючи формулу для векторного потенціалу і рівняння Гельмгольца для функції Гріна вільного простору, отримано інтегральне представлення для компоненти електричного поля

$$\vec{E}(x, y, z) = \iint_{S'} [k_p^2 \vec{I} + \nabla \nabla] \vec{G}_p(x, y, z; x', y', z') \cdot \vec{J}(x', y') dS', \quad (p = 1, 2), \quad (30)$$

де k_p – хвильові числа, $\vec{G}_p(x, y, z; x', y', z')$ – функція Гріна в області p .

Струм $\vec{J}(x', y')$ в (30) – двовимірний і зосереджується у площині неоднорідності

$$\vec{J}(x', y') = J_x(x', y') \vec{x} + J_y(x', y') \vec{y}. \quad (31)$$

Використавши подання струмів (31) за базовими функціями $f_{nx}(x')$, $g_{mx}(y')$ і провівши відповідну дискретизацію, одержимо остаточний вираз для компоненти E_x

$$E_x + \Delta E_x = \sum_{nx=1}^{N_x+1} \sum_{mx=1}^{M_x+1} I_x^{nm} \iint_{S'} K_{xx}(x, y; x', y') f_{nx}(x') g_{mx}(y') dx' dy' + \sum_{ny=1}^{N_y+1} \sum_{my=1}^{M_y+1} I_y^{nm} \iint_{S'} K_{xy}(x, y; x', y') f_{ny}(y') g_{my}(x') dx' dy', \quad (32)$$

де I_x^{nm} , I_y^{nm} – невідомі коефіцієнти розкладу.

Аналогічне рівняння отримуємо для E_y , де $K_{\xi\eta}(x, y; x', y')$ ($\xi, \eta = x, y$) – інтегро-диференціальні оператори. Із застосуванням методу Гальоркіна, рівняння (32) запишемо у матричному вигляді

$$[\mathbf{Z}][\mathbf{I}] = [\mathbf{V}], \quad (33)$$

де \mathbf{Z} – квадратна матриця (імпедансна матриця).

Таким чином, розв'язування прямої електродинамічної задачі зведено до знаходження розв'язків системи лінійних рівняння з невідомими коефіцієнтами I_x^{nm} та I_y^{nm} .

Параметри розсіювання $[S]$ обчислимо за Z -параметрами відомим матричним рівнянням

$$[S] = ([Z] - [I])([Z] + [I])^{-1}. \quad (34)$$

У випадку двопортової неоднорідності (прямокутні згини, смужки, Т-з'єднання), коли кількість вихідних портів може бути зведена до двох і завдяки симетрії системи, Z -параметри можуть бути записані у наступній компактній формі

$$Z_{11} = \frac{Z_{in}^{le} + Z_{in}^{lo}}{2}, Z_{22} = Z_{11}, \quad (35a)$$

$$Z_{12} = \frac{Z_{in}^{lo} - Z_{in}^{le}}{2}, Z_{21} = Z_{12}, \quad (35b)$$

де $Z_{in}^{le,o}$ – вхідний імпеданс порту 1 при парному (непарному) збудженні. Парне збудження відповідає еквівалентним джерелам в обох портах, а непарне – джерелам з однаковою амплітудою і різницею фаз 180° .

Параметри розсіювання для цього випадку є такими

$$S_{11} = \frac{Z_{11}^2 - 1 - Z_{12}^2}{D}, S_{22} = S_{11}, \quad (36a)$$

$$S_{12} = \frac{2Z_{12}}{D}, S_{21} = S_{12}, \quad (36b)$$

де $D = Z_{12}^2 + 2Z_{11} - Z_{12}^2$.

Перераховані вище параметри характеризують ефективність мікросмужкової лінії, їх використовують як оптимізаційні для покращення властивостей випромінювання у робочому діапазоні частот.

Числові розрахунки показують, що для отримання розв'язків прямої електродинамічної задачі з точністю до 1% - 5% необхідно враховувати $(10-15)^2$ членів у рядах (32).

З використанням розробленого комплексу програм проведено оптимізацію параметрів мікросмужкової неоднорідності з метою отримання параметрів матриці розсіювання, які забезпечують її найбільш ефективне функціонування у складі радіочастотного спектрометра стоячих хвиль. Встановлено межі частотного діапазону, в яких значення параметрів матриці розсіювання мікросмужкового елемента забезпечує найбільшу ефективність спектрометра.

В табл. 1 наведено значення параметрів імпедансної матриці Z і матриці розсіювання S для оптимального співвідношення параметрів l , w , L , v і h , де l і w – довжина і ширина полоси збудження, L і v – довжина і ширина полоси поширення, h – висота діелектричної підкладки. В якості діелектричної підкладки використовувався діелектрик “RT-duroid 5880” (відносна діелектрична проникність $\epsilon_1 = 2.2$), товщина підкладки $h = 8 \times 10^{-4}$ м.

Таблиця 1. Елементи імпедансної матриці і матриці розсіювання для оптимальних параметрів мікросмушкового елемента

f (ГГц)	19	20	21	22	23	24	25
Z_{11}	0.7173	0.7041	0.6763	0.7061	0.7101	0.7029	0.7043
Z_{12}	0.6721	0.6663	0.5124	0.6765	0.7020	0.6404	0.6420
S_{11}	0.0459	0.0355	0.1259	0.0282	0.0079	0.0562	0.0563
S_{11} (dB)	-26.76	-29.2	-17.9	-30.7	-42.1	-25.6	-25.4
S_{12}	0.9894	0.9886	0.9555	0.9886	0.9908	0.9778	0.9750
S_{12} (dB)	-0.14	-0.12	-0.39	-0.11	-0.08	-0.195	-0.22

Оптимальні геометричні параметри такі: $w = 2 \times 10^{-4}$ м, $l = 22 \times 10^{-4}$ м, $v = 12 \times 10^{-4}$ м, $L = 10 \times 10^{-4}$ м. У зв'язку із великим обсягом обчислень для окремої частоти, ці значення були оптимізовані тільки на центральній частоті 22 ГГц; значення для інших частот обчислювалися з даним оптимальним набором параметрів.

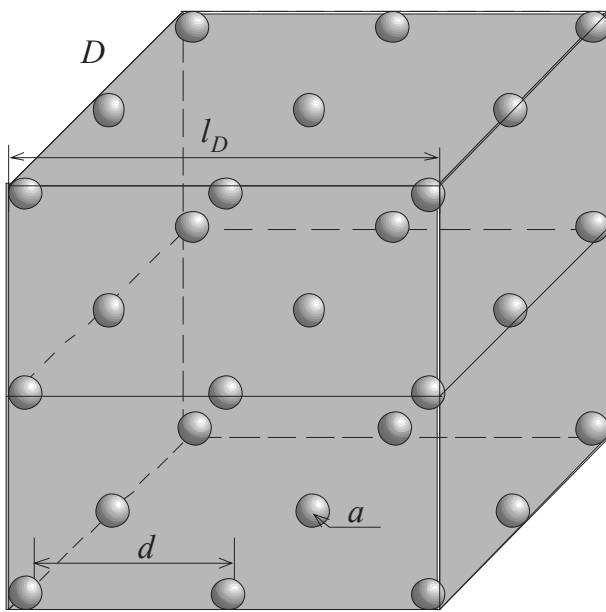


Рис. 8. Геометрія області розсіювання

розмір включення, а d – відстань між сусідніми включеннями і $d > \lambda$, де λ – довжини хвилі (рис. 8).

На поверхні включень задаються граничні умови імпедансного типу. Практичне застосування цього підходу дозволяє створювати матеріали із заданою просторовою дисперсією, тобто створювати коефіцієнт рефракції $n^2(x, \omega)$ із заданою залежністю від частоти ω . Використовуючи цей підхід, можна створити матеріал із від'ємним коефіцієнтом рефракції. Такі матеріали використовуються у багатьох інженерних застосуваннях.

Розв'язок задачі розсіювання записуємо таким чином

$$u^{(j)}(x) = u_0(x) - 4\pi \sum_{m=1, m \neq j}^M G(x, x_m) h(x_m) u(x_m) a^{2-k} [1 + o(1)]. \quad (37)$$

Сьомий і восьмий розділи присвячено проблемі формування середовищ із заданими властивостями для акустичного і електромагнітного випадків, відповідно. У **сьомому** розділі з використанням асимптотичного розв'язку задачі акустичного розсіювання розв'язано проблему формування середовища із заданим коефіцієнтом рефракції. Задачу розсіювання розв'язано за умови, що при збільшенні кількості включень їхній характерний розмір прямує до нуля швидше, ніж співвідношення розміру включення до відстані між ними, тобто значення параметра $ka \ll 1$, $d > a$, де a – характерний

Знаходження поля u чисельно за допомогою формули (37) вимагає, щоб були відомими величини $u_m := u(x_m)$. Ці величини отримують як розв'язки відповідної системи алгебраїчних рівнянь:

$$u_j = u_{0j} - 4\pi \sum_{m=1, m \neq j}^M G(x_j, x_m) h(x_m) u_m a^{2-\kappa}, \quad j = 1, 2, \dots, M, \quad (38)$$

де $G(x, y)$ – функція Гріна рівняння Гельмгольца

$$G(x, y) = \frac{e^{ik|x-y|}}{4\pi|x-y|}. \quad (39)$$

Система (38) ефективно розв'язується чисельно, оскільки її матриця є діагонально переважаючою.

Для знаходження розв'язку початкової задачі використовуємо також метод колокацій, що приводить до системи лінійних рівнянь:

$$u_j = u_{0j} - 4\pi \sum_{p=1, p \neq j}^P G(x_j, x_p) h(y_p) N(y_p) u_p |\Delta_p|, \quad p = 1, 2, \dots, P, \quad (40)$$

де P – кількість малих підобластей (кубів) Δ_p , y_p – центр Δ_p , $|\Delta_p|$ – об'єм Δ_p . Об'єднання Δ_p формує розбиття D , а діаметр Δ_p рівний $O(d^{1/2})$. З обчислювальної точки зору розв'язання системи (40) набагато легше, ніж системи (38), оскільки $P \ll M$.

Таким чином, маючи дві різні системи лінійних рівнянь, які відповідають формулі (37) і початковій задачі розсіювання, і порівнюючи їхні розв'язки, ми визначаємо межі застосування запропонованого асимптотичного підходу розв'язання задачі розсіювання.

Запропоновано конструктивну процедуру формування середовища із коефіцієнтом рефракції, близьким до заданого. Формування бажаного коефіцієнта рефракції відбувається шляхом вибору допоміжних функцій, які характеризують густину розподілу включень у заданій області або їхній поверхневий імпеданс.

Одержані числові результати демонструють можливість формування коефіцієнта рефракції результуючого середовища, який суттєво відрізняється від коефіцієнта рефракції початкового середовища (див. рис. 9 і рис. 10).

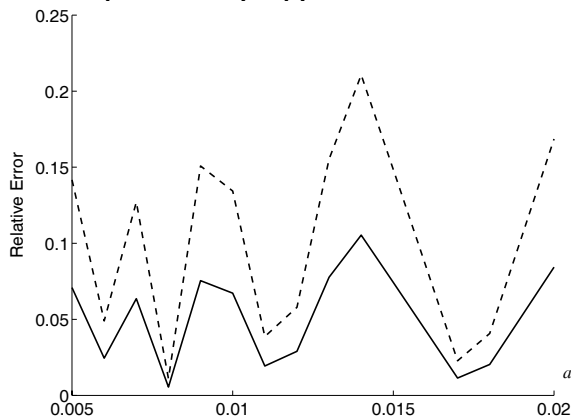


Рис. 9. Мінімальна відносна похибка для отриманого коефіцієнта рефракції $\tilde{n}^2(x)$, $N(x) = 20$

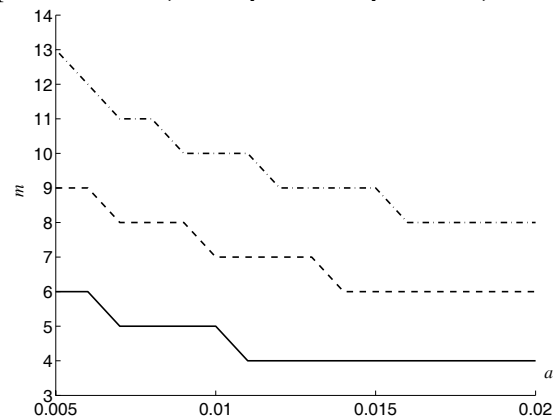


Рис. 10. Залежність оптимального значення m від радіуса a включення для різних $N(x)$

Результати на рис. 9 свідчать, що існують певні значення радіуса a включень (при фіксованих значеннях решти параметрів області), при яких різниця між заданим і одержаним коефіцієнтами рефракції є мінімальною, а результати на рис. 10 вказують, що існує оптимальна кількість включень M ($M = m^3$), при яких можна отримати найбільш точне наближення до заданого коефіцієнта рефракції.

У **восьмому розділі** розв'язано електродинамічну задачу формування середовищ із заданими коефіцієнтом рефракції чи магнітною проникністю. На відміну від попереднього розділу, де задача була скалярною, тут необхідно враховувати векторний характер електромагнітного поля, тому процедура розв'язування прямої задачі і розробка алгоритму формування відповідних характеристик є складнішими.

Із використанням асимптотичного підходу розроблено аналітико-числовий метод розв'язування задачі розсіювання електромагнітних хвиль на сукупності включень малого розміру. Розглянуто випадки ідеально провідних тіл та тіл, на поверхні яких задаються граничні умови імпедансного типу. Перевага запропонованого підходу полягає у тому, що виключається необхідність розв'язування граничних інтегральних рівнянь, розв'язки яких у стандартному підході використовуються для знаходження компонент електромагнітного поля у середовищі.

Розв'язок задачі розсіювання у випадку одного включення отримано в явному вигляді, а для сукупності тіл розв'язується система лінійних алгебраїчних рівнянь, розмірність якої визначається кількістю включень. Розв'язки цієї системи рівнянь використовуються при отриманні розв'язку задачі в усьому просторі R^3 . У випадку одного включення проведено порівняння одержаного асимптотичного розв'язку з відомим аналітичним представленням. У випадку багатьох включень розв'язок отриманої системи лінійних алгебраїчних рівнянь порівнюється із розв'язком системи, яка є наслідком еквівалентного початковій задачі інтегрального рівняння Фредгольма II-го роду. Встановлено межі використання асимптотичного підходу.

Для випадку сукупності малих ідеально провідних тонких циліндрів встановлено можливість формування середовища із бажаним коефіцієнтом рефракції.

У першому підрозділі розглянуто методику отримання розв'язку задачі розсіювання у випадку, коли на границі тіл задано граничні умови імпедансного типу. Асимптотичний розв'язок отримано при умові, що розмір включень прямує до нуля, а їхня кількість зростає за певним законом у заданій обмеженій області простору R^3 . Відстань d між включеннями є величина порядку $O(a)$, де a – характерний розмір включення. Для випадку, що розглядається, $d \ll \lambda$, де λ – довжина хвилі.

Для випадку одного включення розв'язок записано явно

$$E(x) = E_0(x) - \frac{i\zeta |S|}{\omega\mu_0} [\nabla_x g(x, O), \tau \nabla \times E_0(O)], \quad (41)$$

де ζ – поверхневий імпеданс, $g(x, y)$ – функція Гріна вільного простору, $E_0(x)$ – падаюче поле. Для перевірки коректності розробленого підходу асимптотичний розв’язок (41) порівнюється із розв’язком, отриманим на основі класичного розв’язку Мі.

Для випадку багатьох включень задача зводиться до еквівалентного інтегрального рівняння, розв’язок якого отримано у вигляді скінченної суми

$$E(x) = E_0(x) + \sum_{m=1}^M [g(x, x_m)V_m + \nabla_x g(x, x_m)v_m], \quad (42)$$

де V_m і v_m , $1 \leq m \leq M$ – невідомі коефіцієнти, які визначають з відповідної системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Похибка розв’язку (42) оцінюється величиною $O(a/d + ka)$ в області $\min_{1 \leq m \leq M} |x - x_m| := d \ll a$.

Числові результати, отримані на підставі асимптотичного підходу розв’язання задачі розсіяння електромагнітного поля сукупністю включень малого радіуса, дали змогу визначити межі застосування такого підходу і залежність точності її розв’язку від геометричних параметрів області включень.

У другому підрозділі розвинуто асимптотичний підхід до розв’язування задачі електромагнітного розсіювання на сукупності тіл, які представляють безмежно довгі циліндри малого радіуса a , де $a \rightarrow 0$. Поверхні циліндрів є ідеально провідними.

Отримано рівняння для граничного поля при $a \rightarrow 0$. Виведено формулу для ефективного коефіцієнта рефракції $n^2(x)$, отриманого у результаті включення сукупності циліндрів у задану область. Отримані числові результати демонструють ефективність запропонованого підходу для розв’язування задач електромагнітного розсіювання на сукупності тіл малого розміру, а також можливість формування середовищ із від’ємним коефіцієнтом рефракції (рис. 11 і рис. 12). Як видно з числових результатів, для того, щоб отримати значення n^2 , яке буде найбільше відрізнятися від його значення для початкового середовища, необхідно зменшувати відстань d між включеннями.

На основі розробленого підходу створено програмне забезпечення для числового моделювання середовищ із заданим коефіцієнтом рефракції.

У третьому підрозділі розглянуто задачу розсіювання електромагнітного поля малими імпедансними включеннями і розроблено метод формування середовища із заданою магнітною проникністю.

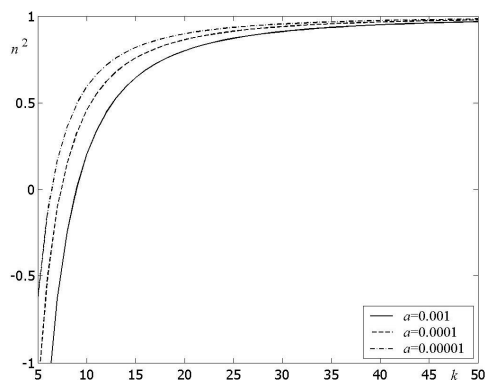
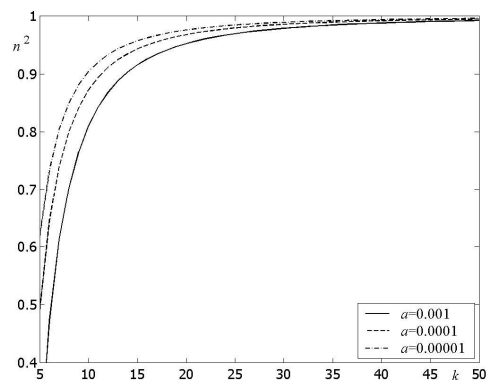
Для розрахунку компонент вектора E отримано явну формулу

$$E(x) = E_0(x) - \frac{8\pi i}{3\omega\mu_0} \nabla \times \int_D g(x, y)h(y)N(y)\nabla \times E(y)dy, \quad (43)$$

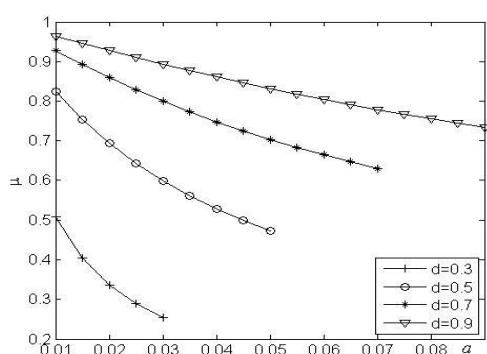
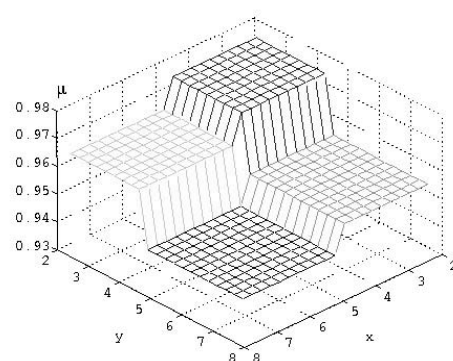
де $h(y)$ – функція, яка описує поверхневий імпеданс, а $N(y)$ – функція, яка описує густину розподілу включень в області D , а вектори $P := \nabla \times E(y)$ визначають у процесі розв’язання допоміжної системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Нову магнітну проникність $\mu(x)$ визначають за формулою:

$$\mu(x) = \frac{\mu_0(x)}{\Psi(x)} = \frac{\mu_0}{1 + \frac{8\pi i}{3\omega\mu_0} h(x)N(x)}. \quad (44)$$

а) $M = 225, d = 0.0204 \text{ м}$ б) $M = 225, d = 0.0099 \text{ м}$ Рис. 11. Залежність n^2 від значення k

Електромагнітні властивості граничного середовища описуються змінною магнітною проникністю (див. рис. 12 і рис. 13) і новим коефіцієнтом рефракції $K^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu(x)$. На рис. 12 показано числові результати, які демонструють можливість моделювання постійної магнітної проникності у середовищі (функція $h(x)$ постійна і однакова для всіх включень), відмінної від магнітної проникності середовища без включень, а на рис. 13 – результати моделювання кусочно-постійної магнітної проникності за рахунок вибору різних $h(x)$ у окремих підобластях. Значення магнітної проникності μ , наведені на рис 12 і рис. 13, пронормовані на величину $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Г/м}$ – значення магнітної проникності вільного простору.

Рис. 12. Залежність магнітної проникності μ від радіуса включення a Рис. 13. Кусово-постійний розподіл $\mu(x)$ для різних $h(x)$ у окремих підобластях Δ_p .

Розроблено обчислювальні алгоритми і програмне забезпечення для формування середовищ із неоднорідною магнітною проникністю $\mu(x)$. Формування таких значень $\mu(x)$ відбувається шляхом зміни функції $h(x)$, яка

описує поверхневий імпеданс включень, або за рахунок розміщення у підобластях Δ_p області D різної кількості тіл M_p малого радіуса a .

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-технічну проблему розвинення теорії математичного моделювання випромінюючих систем та формуючих середовищ на основі загального операторного представлення розв'язків прямих задач, застосування єдиного варіаційного підходу до визначення оптимальних параметрів цих систем і середовищ.

У результаті розв'язання цієї проблеми отримано такі теоретичні та практичні результати:

1. Розроблено новий напрямок математичного моделювання випромінюючих систем та формуючих середовищ на основі загального операторного представлення розв'язків прямих електродинамічних і акустичних задач, застосування єдиного варіаційного підходу до формулювання відповідних оптимізаційних задач на визначення параметрів цих систем та середовищ, які забезпечують виконання вимог до них у межах вибраного критерію оптимізації.
2. Запропоновано узагальнення варіаційних постановок задач синтезу за заданими амплітудною та енергетичною ДС, які дозволяють виключати із розгляду відповідних нелінійних інтегральних рівнянь розв'язки, які суперечать фізичним міркуванням, а також формувати поле потрібної структури у заданих областях ближньої чи середньої зони випромінюючої системи.
3. Модифіковано метод Ньютона для розв'язування нелінійних інтегральних рівнянь та їх систем, які виникають у задачах синтезу випромінюючих систем за заданими амплітудною або енергетичною ДС. Модифікація забезпечує знаходження розв'язків з однаковими фазовими властивостями у широкому діапазоні частот.
4. Виявлено сімейства розв'язків задачі амплітудно-фазового синтезу за заданою енергетичною ДС для лінійних антен і решіток, які є кращими від відомих раніше за значенням оптимізаційного критерію.
5. Як і в задачах амплітудно-фазового синтезу апертурних антен, в задачі синтезу плоских решіток встановлено, що при заданих симетричних ДС існують оптимальні розв'язки, яким відповідає дійсний (синфазний) розподіл струмів в обох напрямках решітки. Ці розв'язки відгалужуються першими від розв'язків з дійсними ДС при невеликих розмірах решіток і є кращими за вибраним критерієм у порівнянні з первинними розв'язками на 15-20 %. Одержані результати дозволяють зменшити лінійні розміри решітки в межах 10-15 %.
6. Вдосконалено електродинамічну модель плоскої хвилеводної антенної решітки, яка враховує взаємодію окремих елементів. Обґрунтовано узагальнення варіаційної постановки задачі амплітудно-фазового синтезу, яке

- дозволяє забезпечити вимоги електромагнітної сумісності. Для розв'язання задачі синтезу розроблено збіжні ітераційні методи.
7. На основі тривимірної електродинамічної моделі розроблено метод та алгоритми оптимізації параметрів мікросмужкової випромінюючої системи та хвилеводної передавальної системи.
 8. З використанням асимптотичного підходу розроблено метод й алгоритми розв'язування задачі розсіювання акустичних хвиль на сукупності тіл малого розміру. Розроблено аналітико-числовий алгоритм формування середовища із заданим або близьким до заданого коефіцієнтом рефракції. Запропонований підхід використано для дослідження характеристик зворотного розсіювання середовищем, яке містить включення невеликого (порівняно з довжиною хвилі) розміру. Розроблено комплекс програм для розрахунку ДС зворотного розсіювання. На основі проведених обчислювальних експериментів одержано сукупність даних, які характеризують ДС зворотного розсіювання для різноманітних геометричних і фізичних параметрів об'єкта розсіювання. Розроблений комплекс програм і одержані результати можуть бути основою для програмного засобу автоматизованої системи неруйнівного контролю.
 9. Розроблено метод і алгоритми розв'язання задачі розсіювання електромагнітного поля на сукупності ідеально провідних циліндрів малого радіуса і створено алгоритм формування середовища із заданим коефіцієнтом рефракції. Розроблені методи і алгоритми можуть використовуватися у процесі моделювання середовищ з від'ємним коефіцієнтом рефракції (кіральні середовища).
 10. Розроблено метод і алгоритми розв'язання задачі розсіювання електромагнітного поля на сукупності малих включень (тіл) з імпедансними граничними умовами. Встановлено межі застосування асимптотичного підходу розв'язання задачі розсіювання. Отримано явну формулу для магнітної проникності неоднорідного середовища, яка визначається густиною включень та їхнім поверхневим імпедансом. Розроблено метод і алгоритми формування середовища із заданою магнітною проникністю.
 11. Розроблені числові методи, алгоритми та комплекси програм використано на етапі проектування випромінюючих систем при розв'язанні задач амплітудно-фазового і фазового синтезу, зокрема, амплітудно-фазового синтезу плоских антенних решіток із різним типом окремих випромінювачів, у процесі оптимізації параметрів мікросмужкових випромінюючих систем і фазових перетворювачів поля, а також при формуванні середовищ із заданими акустичними чи електромагнітними властивостями.
 12. Внаслідок відомої аналогії задач синтезу та оптимізації параметрів електродинамічних та акустичних антенних систем із задачами синтезу радіосигналів, оптичних та квазіоптичних систем, розроблені математичні методи та алгоритми можуть бути використані в процесі розв'язування науково-прикладних задач у радіофізиці, радіотехніці та акустиці.

Достовірність основних наукових положень і одержаних результатів забезпечується використанням фізично обґрунтованих математичних моделей, випромінюючих систем і формуючих середовищ. Аналітико-числові методи, які застосовуються для розв'язання поставлених оптимізаційних задач, є обґрунтованими, їх збіжність встановлена на основі доведених теорем та отриманих числових результатів. Достовірність отриманих результатів підтверджується також співпадінням теоретичних висновків з результатами числових розрахунків. Частина результатів узгоджується з тими, що одержані при проведенні аналогічних досліджень і відомі з літературних джерел та шляхом експерименту.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Андрийчук М. И. Синтез антенн по амплитудной диаграмме направленности. Численные методы и алгоритмы / М. И. Андрийчук, Н. Н. Войтович, П. А. Савенко, В. П. Ткачук // Київ : Наук. Думка, 1993. – 256 с.
2. Andriychuk M. I. Scattering by many small particles and creating materials with a desired refraction coefficient / M. I. Andriychuk, A. G. Ramm // Intern. Journ. of Computing Science and Mathematics. – 2010. – Vol. 3, Nos.1/2. – P. 102-121. doi: 10.1504/IJCSM.2010.033929.
3. Andriychuk M. I. Electromagnetic wave scattering by a small impedance particle: Theory and modeling / M. I. Andriychuk, S. W. Indratno, A. G. Ramm // Optics Communications. – 2012. – Vol. 285. – Issue 7. – P. 1684-1691. doi: 10.1016/j.optcom.2011.12.055.
4. Ramm A. G. Calculation of electromagnetic wave scattering by a small impedance particle of an arbitrary shape / A. G. Ramm, M. I. Andriychuk // Mathematical Modeling of Natural Phenomena. – 2014. – Vol. 9. – Issue 5. – P. 254-269. doi:10.1051/mmnp/20149517.
5. Ramm A. G. Scattering of electromagnetic waves by many thin cylinders: Theory and computational modeling / A. G. Ramm, M. I. Andriychuk // Optics Communications. – 2012. – Vol. 285. – Issue 20. – P. 4019-4026. doi: 10.1016/j.optcom.2012.06.017.
6. Ramm A. G. Application of the asymptotic solution to EM field scattering problem for creation of media with prescribed permeability / A. G. Ramm, M. I. Andriychuk // J. Appl. Math. Comput. – 2014. – Vol. 45, No 1. – P. 461-485. doi: 10.1007/s12190-013-0732-7.
7. Andriychuk M. Non-linear synthesis problems for plane radiating systems according to the prescribed power directivity pattern / M. Andriychuk, P. Savenko, M. Tkach // Open Journal of Antennas and Propagation. – 2013. – Vol. 1. – P. 23-34. doi: 10.4236/ojapr.2013.12006.
8. Андрийчук М. И. Синтез плоских излучающих систем по заданной энергетической диаграмме направленности / М. И. Андрийчук, В. Ф. Кравченко,

- П. А. Савенко, М. Д. Ткач // Физические основы приборостроения. – 2013. – Т. 2, № 3. – С. 40-55.
9. Andriychuk M. The application of the magnitude synthesis method to the case of the spherical antennas / M. Andriychuk, J. Jarkowski P. Savenko, Y. Topolyuk, N. Voitovich // Kleinheubacher Berichte, BRD. – 1994. – В. 37. – Р. 109-115.
 10. Andriychuk M. I. Numerical solution of many-body wave scattering problem for small particles and creating materials with desired refraction coefficient / M. I. Andriychuk, A. G. Ramm / Numerical Simulations of Physical and Engineering Processes; Jan Awrejcewich, ed. – Rieka : InTech, 2011. – Р. 3-28. doi: 10.5772/24495.
 11. Andriychuk M. I. Synthesis of antenna systems according to the desired amplitude radiation characteristics / M. I. Andriychuk / Numerical Simulations – from Theory to Industry; Mykhaylo Andriychuk, ed. – Rieka : InTech, 2012. – Р. 191-218. doi: 10.5772/46164.
 12. Андрійчук М. І. Синтез лінійної антенної решітки з хвилеводними випромінювачами / М. І. Андрійчук // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 2003. – Т. 46, № 3. – С. 166-173.
 13. Андрійчук М. І. Моделювання хвилеводних випромінювальних систем на основі їхніх амплітудних характеристик / М. І. Андрійчук, О. Ф. Заморська // Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика : Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2004, № 522. – С. 129-136.
 14. Андрійчук М. І. Оптимізація амплітудних характеристик випромінювання хвилеводних антен у частотному діапазоні / М. І. Андрійчук, О. Ф. Заморська // Радіоелектроніка та телекомунікації : Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2006. – № 557. – С. 114-121.
 15. Андрійчук М. І. Розрахунок і оптимізація характеристик розсіяння хвилеводної антенної решітки / М. І. Андрійчук // Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика : Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2006. – № 564. – С. 94-101.
 16. Андрійчук М. І. Розрахунок електродинамічних параметрів мікросмушкових неоднорідностей з використанням аналітико-числового підходу / М. І. Андрійчук // Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика : Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2008. – № 626. – С. 103-109.
 17. Андрійчук М. І. Моделювання середовищ із заданим коефіцієнтом заломлення / М. І. Андрійчук // Відбір і обробка інформації. – 2010. – Вип. 32 (108). – С. 9-15.
 18. Андрійчук М. І. Аналітико-числове розв'язування задачі розсіяння електромагнітних хвиль малими включеннями / М. І. Андрійчук // Відбір і обробка інформації. – 2010. – Вип. 33 (109). – С. 15-21.
 19. Андрійчук М. І. Моделювання середовищ із заданим коефіцієнтом заломлення на основі характеристик розсіяння електромагнітного поля / М. І. Андрійчук // Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика :

- Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2010. – № 685. – С. 69-78.
20. Андрійчук М. І. Зворотнє розсіяння малими включеннями у акустичному полі / М. І. Андрійчук, В. П. Ткачук. // Радіоелектроніка та телекомунікації : Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2011. – № 705. – С. 10-16.
 21. Андрійчук М. І. Синтез лінійної хвилеводної решітки з використанням варіаційного підходу і методу апертурних ортогональних поліномів / М. І. Андрійчук, В. П. Ткачук // Відбір і обробка інформації. – 2011. – Вип. 35 (111). – С. 10-15.
 22. Андрійчук М. Моделювання середовища із заданою магнітною проникністю на основі асимптотичного розв’язку задачі електромагнітного розсіяння / М. Андрійчук, В. Ткачук // Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика : Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2011. – № 711. – С. 58-63.
 23. Andriychuk M. I. Non-destructive testing of materials based on the wave scattering by the small particles / M. I. Andriychuk // Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика : Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2012. – № 747. – С. 93-101.
 24. Андрійчук М. І. Синтез плоскої гексагональної антенної решітки за заданою енергетичною діаграмою спрямованості / М. І. Андрійчук // Відбір і обробка інформації. – 2013. – Вип. 38 (114). – С. 5-12.
 25. Андрійчук М. І. Дослідження властивостей розв’язків задачі електромагнітного розсіяння на сукупності включень малого розміру / М. І. Андрійчук // Радіоелектроніка та телекомунікації : Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2013. – № 766. – С. 156-161.
 26. Andriychuk M. Modified Newton method for antenna power synthesis problem with fixed norm of the pattern / M. Andriychuk, M. Voytovych // Журнал прикладної та обчислювальної математики. – 2014. – №. 2 (116). – С. 3-10.
 27. Andriychuk M. I. Modeling the electromagnetic wave scattering by small impedance particle / M. I. Andriychuk // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика. – 2014. – № 808. – С. 36-42.
 28. Andriychuk M. I. Applying the concept of generating polynomials to the antenna synthesis problem by power criterion / M. I. Andriychuk, O. O. Bulatsyk, M. M. Voytovych // Mathematical Modeling and Computing. – 2014. – Vol. 1. – No. 2. – P. 121-134.
 29. Andriychuk M. I. Conformal resonator antenna synthesis according to a prescribed amplitude pattern / M. I. Andriychuk, Yu. P. Topolyuk / Proc. of Int. Symp. on Antennas and Propag. – Tokyo, 1989. – Vol. 4. – P. 897-900.
 30. Andriychuk M. I. Numerical solution of one class of antenna synthesis theory ill-posed problems / M. I. Andriychuk, P. O. Savenko, Yu. P. Topolyuk / Proc. of URSI Int. Symp. on Electromagn. Theory. – St. Petersburg, 1995. – P. 711-713.

31. Andriychuk M. I. Modeling the directivity properties of antennas using the numerical approach / M. I. Andriychuk / Proc. of IIIrd IMACS/ IEEE Int. Conf. on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC'99). – Athens, Greece, 1999. – 6 p.
32. Andriychuk M. I. Synthesis of the waveguide array according to the prescribed amplitude radiation pattern / M. I. Andriychuk, P. O. Savenko / Abstracts of Millennium Conference on Antennas and Propagation (AP-2000). – Davos, Switzerland, 2000. – Vol. 1. – P. 178.
33. Andriychuk M. I. Numerical modeling the directivity properties of antennas / M. I. Andriychuk / Proc. of XIII International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON-2000). – Wroclaw, Poland, 2000. – Vol. 1. – P. 170-173.
34. Andriychuk M. I. The analytical and numerical aspects of modeling the antenna systems according to the prescribed amplitude radiation pattern / M. I. Andriychuk / Proc. of XIth Intern. Symp. on Theoretical Electrical Engineering (ISTET-2001) – Linz, Austria, 2001. – 6 p.
35. Andriychuk M. Waveguide antenna synthesis according to the amplitude radiation characteristics in the frequency band / M. Andriychuk, O. Zamorska / Abstracts of Ist European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP-2006). – Nice, France, 2006. – P. 150.
36. Andriychuk M. I. Numerical modeling in wave scattering problem for small particles / M. I. Andriychuk, A. G. Ramm / Proc. of 18th International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON-2010). – Vilnius, Lithuania: Geozondas, 2010. – Vol. 1. – P. 224-227.
37. Andriychuk M. I. Electromagnetic wave scattering by small bodies and creating materials with desired permeability: Numerical implementation / M. I. Andriychuk / Proc. of the 2011 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA-2011). – Torino, Italy, 2011. – P. 243-246.
38. Andriychuk M. I. Modeling the radiation characteristics of plane waveguide array using the variational approach / M. I. Andriychuk, V. P. Tkachuk / Proc. of 2011 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications. – Torino, Italy, 2011. – P. 247-250.
39. Andriychuk M. Synthesis of plane antenna systems according to a given power directivity pattern / M. Andriychuk, P. Savenko, M. Tkach / Proc of 2013 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS). – Iasi, Romania, 2013 – 4p. doi: 10.1109/ISSCS.2013.6651199.
40. Ramm A. Creating media with prescribed permeability using the asymptotic solution to EM wave scattering problem / A. Ramm, M. Andriychuk / Proc. of 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON-2014). – Gdansk, Poland, 2014. – Vol. 1. – P. 356-359. doi: 10.1109/MIKON.2014.6899916.
41. Savenko P. O. Some classes of nonlinear synthesis problems for radiation systems: Theory and methods of solution / P. O. Savenko, B. M. Podlevskii,

- M. D. Tkach, M. I. Andriychuk / Proc. of Int. Conf. on Math. Methods in Electromagn. Theory (MMET-2002). – Kharkiv, 2002. – Vol. 1. – P. 79-85.
42. Andriychuk M. I. Some generalizations for the synthesis problem of the waveguide antenna array / M. I. Andriychuk, O. F. Zamorska / Proc. of Intern. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-2004). – Dnepropetrovsk, 2004. – P. 487-489.
 43. Andriychuk M. I. The antenna systems synthesis according to the amplitude characteristics under condition of electromagnetic compatibility / M. I. Andriychuk, O. F. Zamorska / Proc. of 2004 Second Intern. Workshop on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. – Sevastopol, 2004. – P. 135-137.
 44. Andriychuk M. I. Optimization of the antenna radiation patterns using the phase control / M. I. Andriychuk / Proc. of XIIIth International Symposium on Theoretical Electrical Engineering. – Lviv, 2005. – P. 3-6.
 45. Andriychuk M. Phase optimization in the synthesis problems with the amplitude radiation pattern / M. Andriychuk / Proc. of VIIIth International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, 23-26 February, 2005, Lviv-Polyana, Ukraine. – Lviv : NULP, 2005. – P. 131-136.
 46. Andriychuk M. I. Numerical solution of nonlinear synthesis problems of antenna arrays with regard for coupling of radiators / M. I. Andriychuk, L. M. Klakovych, P. O. Savenko, M. D. Tkach / Proc. of Vth International Conference on Antenna Theory and Techniques. – Kyiv, 2005. – P. 213-216.
 47. Andriychuk M. Frequency-dependent synthesis of waveguide antennas according to the amplitude characteristics / M. Andriychuk, O. Zamorska / Proc. of Intern. Conf. on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. – Lviv, 2006. – P. 504-507.
 48. Andriychuk M. I. Synthesis of resonant waveguide antenna with various requirements in the frequency band / M. I. Andriychuk, O. F. Zamorska / Proc. of 2006 IIIrd Intern. Workshop on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. – Sevastopol, 2006. – P. 291-293.
 49. Andriychuk M. I. Evaluation of impedance matrix elements for microstrip T-junction discontinuity / M. I. Andriychuk, S. Hemour / Proc. of XIIth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED-2007). – Lviv, 2007. – P. 54-58.
 50. Voitovich N. N. Transformation of field in regular waveguide via phase correctors / N. N. Voitovich, M. I. Andriychuk / Proc. of XIIth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED-2007). – Lviv, 2007. – P. 63-66.
 51. Andriychuk M. I. Application of space domain integral equation approach for electromagnetic analysis of microstrip structures / M. I. Andriychuk, S. Hemour / Proc. of 12th Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-2008). – Kharkiv, 2008. – P. 340-342.

52. Andriychuk M. I. Application of modified Newton method to nonlinear integral equation of circular antenna synthesis problem / M. I. Andriychuk, O. O. Bulatsyk, N. N. Voitovich / Proc. of XIIIth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED-2008). – Lviv-Tbilisi, 2008. – P. 134-137.
53. Andriychuk M. I. Numerical solution of many-body wave scattering problem for small particles / M. I. Andriychuk, A. G. Ramm / Proc. of XIVth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED-2009). – Lviv, 2009. – P. 77-81.
54. Andriychuk M. Creation the media with desired refraction coefficient / M. Andriychuk / Proc. of VIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design. – Lviv : NULP, 2010. – P. 106-110.
55. Andriychuk M. I. Comparative synthesis of waveguide array using the variational approach and R-function method / M. I. Andriychuk, V. P. Tkachuk / Proc. of 2010 XVth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED). – Lviv-Tbilisi, 2010. – P. 169-173.
56. Andriychuk M. Investigation of interaction between small particles in acoustic field / M. Andriychuk / Proc. of XIth International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics. – Lviv : NULP, 2011. – P. 231-234.
57. Andriychuk M. I. Asymptotic scattering of EM waves by thin cylinders and application / M. I. Andriychuk / Proc. of 14th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-2012). – Kharkiv, 2012. – P. 92-95.
58. Andriychuk M. I. Application of acoustic wave scattering on the small particles for the non-destructive testing / M. I. Andriychuk, V. P. Tkachuk / Proc. of 2012 XVIIth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED). – Tbilisi, 2012. – P. 211-216.
59. Katsenelenbaum B. Z. Phase optimization problems in antenna synthesis theory / B. Z. Katsenelenbaum, N. N. Voitovich, V. V. Semenov, R. B. Vaganov, P. O. Savenko, M. I. Andriychuk, Yu. N. Kazantsev, V. P. Tkachuk, A. N. Sivov, A. D. Shatrov, E. N. Korshunova, O. F. Zamorska, S. A. Yaroshko, V. J. Anokhin, O. M. Gis, Yu. P. Topolyuk, O. O. Bulatsyk, M. D. Tkach / Proc. of 2013 IXth International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT-2013). – Odesa, 2013. – P. 22-27. doi: 10.1109/ICATT.2013.6650678.
60. Andriychuk M. I. Antenna synthesis according to power radiation pattern with condition of norm equality / M. I. Andriychuk, N. N. Voitovich / Proc. of 2013 XVIIIth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED). – Lviv, 2013. – P. 137-140.
61. Andriychuk M. Polynomial approach to linear antenna array synthesis problem according to power radiation pattern with restriction to its norm / M. Andriychuk,

- O. Bulatsyk, N. Voitovich / Proc. of 15th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-2014). – Dnepropetrovsk, 2014. – P. 36-38. doi: 10.1109/MMET.2014.6928739.
62. Andriychuk M. I. New solutions to synthesis problem of plane array with hexagonal geometry / M. I. Andriychuk / Proc. of 2014 XIXth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED). – Tbilisi, 2014. – P. 67-71. doi: 10.1109/DIPED.2014.6958325.

АНОТАЦІЇ

Андрійчук М. І. Математичне моделювання та числова оптимізація характеристик випромінюючих і хвилеводних систем та формуючих середовищ. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національний університет “Львівська політехніка”, Міністерство освіти і науки України, Львів, 2015.

Дисертація присвячена побудові математичних моделей плоских випромінюючих систем за заданими амплітудними характеристиками та розрахунку і оптимізації параметрів формуючих середовищ.

У роботі на основі варіаційного підходу сформульовано нелінійні оптимізаційні задачі синтезу випромінюючих систем за заданими амплітудними характеристиками. Запропоновано узагальнення варіаційних постановок задач, які дозволяють одержувати розв’язки, що не суперечать фізичним міркуванням, а також задовольняють додаткові умови на значення поля в ближній зоні, зокрема, умови електромагнітної сумісності. Одержано нелінійні інтегральні та матричні рівняння Ейлера відповідних функціоналів.

Для дослідження кількості розв’язків цих рівнянь та їхніх властивостей розроблено аналітико-числові та числові методи, визначено загальну структуру розв’язків та їхні якісні властивості. Розроблені методи дають можливість знайти розв’язки з різними властивостями і з усієї сукупності вибрати той, який у найбільшій мірі задовольняє заданому критерію, а також є найбільш зручним з точки зору практичної реалізації.

Розроблено алгоритми і методи для розв’язування задач розрахунку і оптимізації параметрів мікросмужкової випромінюючої системи та оптимізації параметрів фазових перетворювачів електромагнітних полів.

Розроблено числові й аналітико-числові методи розв’язання задач формування середовищ із заданими електромагнітними та акустичними властивостями. Зокрема, встановлено, що акустичне середовище із сукупністю включень малого радіуса має коефіцієнт рефракції, який суттєво відрізняється (включаючи від’ємні значення) від коефіцієнта рефракції середовища без таких включень.

У випадку електромагнітного середовища з малими включеннями, на яких задано імпедансні умови (кулі малого радіуса), або які є абсолютно провідними (циліндри малого радіуса), можна формувати середовище, яке має відмінну від початкової магнітну проникність або відмінний від початкового коефіцієнт рефракції.

Ключові слова: математичне моделювання, випромінюючі системи, формуючі середовища, амплітудна й енергетична діаграми спрямованості, нелінійні задачі синтезу, галуження розв'язків.

Андрийчук М. И. Математическое моделирование и численная оптимизация характеристик излучающих и волноведущих систем и формирующих сред. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Национальный университет “Львівська політехніка”, Министерство образования и науки Украины, Львов, 2015.

Диссертация посвящена построению математических моделей плоских излучающих систем и формирующих сред, разработке численных методов решения соответствующих оптимизационных задач по заданным амплитудным характеристикам и оптимизации параметров формирующих сред.

В работе с использованием вариационного подхода сформулированы нелинейные оптимизационные задачи синтеза излучающих систем по заданным амплитудным характеристикам. Предложены обобщения вариационных постановок задач синтеза, позволяющие получать решения которые не противоречат физическим предположениям, а также позволяют удовлетворять дополнительные требования к значениям поля в ближней зоне, в частности, условия электромагнитной совместимости. Получены нелинейные интегральные и матричные уравнения Эйлера соответствующих функционалов.

Для исследования количества решений этих уравнений и их свойств разработаны аналитико-численные и численные методы, определена общая структура решений и их качественные свойства. Разработанные методы позволяют находить решения с различными свойствами и со всего множества решений выбрать то, которое в наибольшей степени удовлетворяет используемому критерию и является наиболее удобным с точки зрения практической реализации.

Разработаны алгоритмы и методы решения задач расчета и оптимизации параметров микрополосковой излучающей системы и оптимизации параметров фазовых преобразователей электромагнитных полей.

Разработаны аналитико-численные и численные методы решения задач формирования сред с заданными акустическими и электромагнитными свойствами. В частности, установлено, что акустическая среда с множеством

включений малого размера имеет коэффициент рефракции, который существенно отличается (включая отрицательные значения) от коэффициента рефракции начальной среды без включений.

В случае электромагнитной среды с малыми включениями, на которых заданы импедансные условия (шары малого радиуса), или которые являются идеально проводящими (цилиндры малого радиуса), можно получить среду, которая имеет отличительную от начальной магнитную проницаемость или отличительный от начального коэффициент рефракции.

Ключевые слова: математическое моделирование, излучающие системы, формирующие среды, амплитудная и энергетическая диаграммы направленности, нелинейные задачи синтеза, ветвление решений.

Andriychuk M. I. Mathematical modeling and numerical optimization of characteristics of the radiated and waveguide systems and forming media. – Manuscript.

A Doctor Science degree's thesis in the technical sciences on specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2015.

Thesis is devoted to development of the mathematical models of plane radiating systems and forming media, to creation of numerical methods for solving the corresponding optimization problems on the given amplitude characteristics and optimization of the parameters of forming media.

In the first chapter, the main achievements in the field of development and construction of mathematical models of radiating systems and forming media are analyzed, the unsolved problems are identified, and methods of their solution are announced.

In the second chapter, the basic relations for electromagnetic and acoustic fields in a homogeneous medium are given, the methods for solving the direct problems are described, the variational problems of antenna synthesis by given amplitude and power characteristics are formulated, the chosen approaches for solving arising direct and inverse problems are justified.

In the third chapter, the synthesis problems of plane array on a given power radiation pattern (RP) are solved using the generalized Newton's method. Investigations of solutions of the corresponding nonlinear equations are carried out. A generalization of the synthesis problem, that allows to avoid zero solutions to the nonlinear equations at the certain values of the array parameters, is proposed. The analytical solutions of the synthesis problem are derived using their polynomial representation.

The fourth chapter is devoted to solving the problem of amplitude-phase synthesis of the linear waveguide array. A generalization of the variational

formulation of the problem, allowing to minimize the field values in the specified areas of the near and middle zones, is proposed. Investigations of solutions to the corresponding nonlinear equations are carried out; a series of numerical simulation results of array with accounting the real physical parameters is obtained. The optimization problem of transformation of electromagnetic field in the regular waveguide are formulated and solved too.

The fifth chapter deals with the problem of amplitude-phase synthesis of plane arrays on a given power RP. The nonlinear integral equations of synthesis are derived. The problems associated with the number of solutions to these equations and the properties of solutions are studied using the method of implicit function and the Cauchy problem. The computational results of optimization of the array parameters, which are used in specific engineering applications, are shown.

The sixth chapter is devoted to solving the optimization problems arising in the process of the simulation and optimization of the parameters of microstrip radiating system. The parameters, providing the optimal functioning the system including the radiofrequency stationary wave spectrometer, are determined.

In the seventh chapter, the scattering problem of the acoustic waves on a set of small particles is solved using the asymptotic approach. Explicit solution of the problem is derived that allows to solve effectively the optimization problem of creating the medium with a given refraction coefficient. The numerical algorithms providing to create a medium with given or close to given refraction coefficient are elaborated.

The eighth chapter is devoted to the solution of optimization problems of creation of the electromagnetic media with a given refraction coefficient and a given permeability. Initial electrodynamic problem is solved using the asymptotic approach and Green's function method. The advantage of this approach is that it eliminates the necessity to solve the boundary integral equations for a large number of domains, where the solutions for these domains are used to determine the components of the electromagnetic field in the area outside the region of small bodies.

The main scientific results, obtained in thesis, are summarized in conclusion.

Key words: mathematical modeling, radiating systems, forming media, amplitude and power radiation patterns, nonlinear synthesis problems, branching of solutions.

Підписано до друку 26.10.2015 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Гарн. Таймс.
Умовн. друк арк. 2.09.
Наклад 100 прим. Зам. № 10-5/15

Видруковано у Дослідно-видавничому центрі
Наукового товариства ім. Т. Шевченка

Свідоцтво про внесення до державного реєстру
суб'єктів видавничої справи ДК № 884 від 04.04.2002 р.