

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

"Київський політехнічний інститут"

АДАМЕНКО ЮЛІЯ ФЕДОРІВНА



УДК 621.372.543

**ПРИСТРОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ НА ОСНОВІ
АПОДИЗОВАНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КРИСТАЛІВ**

Спеціальність 05.12.13 – Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ — 2014

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України на кафедрі радіоконструювання та виробництва радіоапаратури.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Нелін Євгеній Андрійович,
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут"
завідувач кафедри радіоконструювання та
виробництва радіоапаратури

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Конін Валерій Вікторович,
Національний авіаційний університет,
Інститут аеронавігації,
професор кафедри аеронавігаційних систем

доктор технічних наук, доцент
Манько Олександр Олексійович,
Державний університет телекомунікацій,
завідувач кафедри телекомунікаційних технологій

Захист відбудеться "19" травня 2014 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.14 у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 1, ауд. 163.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розіслано " " "

2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



д. т. н., проф. Л. О. Уривський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Пристрої обробки сигналів на основі мікросмужкових ліній (МСЛ) у якості фільтрів нижніх (ФНЧ) та верхніх частот, загороджувальних та смугових фільтрів, фільтрів гармонік широко використовуються в сучасних радіотехнічних системах зв'язку, радіолокації, телекомунікації. Підвищення ефективності таких пристроїв в рамках традиційних рішень дійшло певного "насичення", тому набули розвитку нові напрями, найбільш потужний з яких — використання електромагнітних кристалів (ЕК).

Аналогічно природним кристалам, ЕК характеризуються наявністю дозволених та заборонених зон (ЗЗ), що відповідає повному проходженню та непроходженню хвилі і, відповідно, максимально можливій розв'язці сигналів. ЕК утворюють хвильові неоднорідності, періодично розміщені вздовж напрямку поширення електромагнітних хвиль.

До теперішнього часу мікросмужкові ЕК ще не знайшли широкого використання, що обумовлене такими чинниками. Типові ЕК-неоднорідності у вигляді отворів на заземленій поверхні конструктивно лише поверхневі, а за характером хвильового імпедансу Z — високоімпедансні. Максимальне значення Z (~200 Ом) тільки вдвічі вище, ніж у традиційних МСЛ. Разом з тим, зонну ефективність ЕК можна визначити відношенням $\rho = Z/Z_0$, де Z_0 — хвильовий імпеданс однорідної області (50 Ом). Недостатнє значення ρ суттєво обмежує зонну ефективність та можливості використання аподизації для формування заданих характеристик ЕК. Як показують наші дослідження [1, 2], об'ємні комбіновані неоднорідності, виконані на заземленій поверхні, в діелектричній основі та на сигнальній поверхні дозволяють збільшити максимальне значення Z майже втричі (до 550 Ом). ЕК на основі таких неоднорідностей мають не лише високу зонну ефективність, але й дозволяють в повній мірі використати аподизацію для формування високої частотної вибірності таких структур.

Моделювання ЕК виконується на основі тривимірних моделей. Тривимірне моделювання розширює можливості моделі, але за рахунок її складності зв'язок конструкція \leftrightarrow характеристики стає в значній мірі неявним. В результаті ускладнюється, або навіть стає неможливим, синтез конструкції, що базується на використанні розробником наочності зв'язку конструкція \leftrightarrow характеристики. Актуальною є розробка моделі ЕК на основі об'ємних неоднорідностей, що враховуватиме їх основні конструктивні особливості та буде відносно простою і наочною. Базовим у цій моделі повинно бути використання концепції хвильового імпедансу. Такий підхід відрізняється універсальністю, наочністю, дозволить скористатися апаратом теорії ліній передачі та аналогіями з різних технічних областей, забезпечить можливість з єдиних позицій моделювати не лише ЕК, але й інші кристалоподібні структури (КС).

Аподизація ЕК на основі об'ємних неоднорідностей потребує розробки нових методів структурної аподизації, а також нових видів аподизації (в дисертації їх названо імпедансною та адаптивною). Ці методи мають враховувати конструктивну складність об'ємних комбінованих неоднорідностей та особливості взаємодії падаючого та відбитого полів в структурі ЕК.

Таким чином, актуальною є науково-прикладна задача створення зручної продуктивної моделі складних ЕК-неоднорідностей, розробка методів аподизації ЕК, конструктивних рішень високоефективних ЕК та пристроїв обробки сигналів на їх основі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано згідно тематики наукових досліджень радіотехнічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт 2008 — 2013 рр. «Розробка фізико-технічних основ нанoeлектронних кристалопоподібних пристроїв обробки сигналів» (№ держреєстрації 0108U000622), «Високовибірні резонансно-тунельні кристалопоподібні пристрої обробки сигналів» (№ держреєстрації 0110U002398) та «Високоефективні пристрої обробки сигналів на основі двофазних кристалопоподібних структур» (№ держреєстрації 0112U001657). Отримані результати використано в нових розділах «Нанoeлектронна елемента база» та «Кристалопоподібні пристрої» дисципліни «Функціональна та нанoeлектроніка». Результати роботи є основою нових лекційних курсів та циклів лабораторних робіт з дисциплін «Фізико-технічні основи мікросистемної техніки», «Моделювання мікро- і наноструктур» та «САПР мікро- і наносистем», розроблених та впроваджених за новою спеціальністю «Інтелектуальні технології мікросистемної радіoeлектронної техніки» на радіотехнічному факультеті НТУУ «КПІ».

Мета роботи та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка високоефективних пристроїв на основі аподизованих ЕК.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

- 1) Узагальнення принципів аподизації в природних та штучних структурах; аналіз особливостей аподизації ЕК.
- 2) Розробка імпедансного підходу до моделювання ЕК та імпедансної моделі на цій основі.
- 3) Порівняльний аналіз ефективності ЕК-неоднорідностей різної форми.
- 4) Розробка методів структурної (амплітудної, фазової, крайової) аподизації ЕК на основі об'ємних неоднорідностей та нових видів (імпедансної та адаптивної) аподизації ЕК.
- 5) Створення оригінальних технічних рішень високовибірних ЕК-неоднорідностей, у тому числі з розширеними функціональними можливостями.
- 6) Розробка, комп'ютерне і експериментальне дослідження аподизованих ЕК та пристроїв на їх основі.
- 7) Розробка методології проектування пристроїв обробки сигналів на основі аподизованих ЕК.

Об'єкт дослідження — ЕК-неоднорідності, аподизовані ЕК та пристрої обробки сигналів на їх основі.

Предмет дослідження — імпедансна модель ЕК, принципи аподизації ЕК, підвищення ефективності ЕК-пристроїв.

Методи дослідження — концепція хвильового імпедансу, апарат теорії ліній передачі та МСЛ, методи математичної оптимізації, методи комп'ютерного моделювання та комп'ютерного експерименту в середовищах *Mathcad* і *Microwave Studio (MWS)*.

Експериментальні дослідження пристроїв виконано на спеціалізованих вимірювальних стендах.

Наукова новизна отриманих результатів

1) На основі концепції хвильового імпедансу розроблено моделі ЕК, що забезпечують наочність зв'язку конструкція ↔ характеристики, необхідну для продуктивної розробки ЕК-пристроїв.

2) Запропоновано і досліджено мікросмужкові об'ємні комбіновані ЕК-неоднорідності з хвильовим імпедансом майже втричі вищим, ніж в традиційних ЕК, що забезпечують високу зонну ефективність ЕК і дозволяють в повній мірі використати аподизацію для формування високої частотної вибірності таких структур.

3) Запропоновано і досліджено високоімпедансні ЕК-неоднорідності з уповільненням хвилі до 3,5 разів, що на заданих частотах відповідає зменшенню розмірів ЕК-неоднорідностей, у порівнянні з відомими, приблизно у 1,9 разів.

4) Розроблено методи структурної (амплітудної, фазової, крайової) аподизації ЕК на основі об'ємних неоднорідностей та нові види (імпедансну та адаптивну) аподизації ЕК, що враховують конструктивну складність об'ємних неоднорідностей та особливості взаємодії падаючого та відбитого полів в структурі ЕК.

5) Запропоновано, розроблено і досліджено оригінальні конструкції ЕК-пристроїв з характеристиками різних типів на основі аподизованих ЕК, у тому числі адаптивно аподизований ЕК з розширеним діапазоном перестроювання.

Практичне значення одержаних результатів.

1) Запропонований в дисертації імпедансний підхід до моделювання ЕК та розроблені імпедансні моделі ЕК дозволяють скористатися апаратом теорії ліній передачі, аналогіями з різних технічних областей, що скорочує час розробки.

2) На основі розроблених методів аподизації ЕК сформульовано методику проектування пристроїв на основі аподизованих ЕК.

3) Створені нові конструктивні рішення ЕК та ЕК-пристроїв відрізняються високою вибірністю та технологічністю. Базові з цих конструкцій захищено патентами України.

4) На основі імпедансних моделей, методики проектування аподизованих ЕК та створених технічних рішень ЕК розроблено фізико-технічні засади проектування аподизованих ЕК та ЕК-пристроїв.

5) Результати роботи впроваджено у нових розділах дисципліни "Функціональна та наноелектроніка". На основі результатів дисертації розроблено нові дисципліни "Фізико-технічні основи мікросистемної техніки", "Моделювання мікро- і наноструктур" та "САПР мікро- і наносистем" за новою спеціальністю "Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки" на радіотехнічному факультеті НТУУ "КПІ".

6) Результати дисертаційної роботи впроваджено в ТОВ "Авіарм".

Особистий внесок автора

У публікаціях, написаних у співавторстві здобувачем виконано моделювання ЕК на базі концепції імпедансу з використанням моделі неоднорідної лінії передачі та моделювання ЕК в середовищі *MWS*; розроблено методи амплітудної, крайової, фазової аподизації ЕК та запропоновано нові види аподизації: імпедансну та адаптивну;

запропоновано оригінальні технічні рішення ЕК-неоднорідностей та ЕК. Автором виконано експериментальні дослідження макетів ЕК, ЕК-пристроїв та аналіз отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися на:

- III, IV науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених радіотехнічного факультету НТУУ "КПІ" "*Радіоелектроніка в XXI столітті*" (Київ, 2009, 2010) [3, 4, 5];
- X, XI International Conference "*The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics*" (Lviv-Polyana, 2009, 2011) [6, 7];
- XII international conference for young researchers "*Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems*" (Санкт-Петербург, 2009) [8];
- 14, 15 міжнародному молодіжному форумі "*Радіоелектроніка і молодь в XXI ст.*" (Харків, 2010, 2011) [9, 10];
- 6 международной молодежной научно-технической конференции "*Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций "РТ-2010"*" (Севастополь, 2010) [11];

Публікації. За темою дисертації опубліковано 24 наукові роботи, з яких вісім статей у фахових виданнях [1, 12 – 18] (з них чотири — в іноземних [14, 15, 17, 18]), дев'ять — в працях конференцій [3 – 11], отримано шість патентів України на корисну модель [2, 19 – 23] та патент України на винахід [24].

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації — 119 сторінок, включаючи 58 рисунків, 2 таблиці. Список використаних джерел містить 93 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито сутність і стан наукової задачі, обґрунтовано актуальність створення моделі складних ЕК-неоднорідностей, розробки методів аподизації ЕК для проектування високовибірних ЕК та ЕК-пристроїв. Показано зв'язок дисертації з науковими програмами, сформульовано мету та основні задачі дослідження, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Наведено дані про апробацію та публікацію результатів досліджень.

У **розділі 1** проаналізовано особливості конструкцій та характеристик ЕК. Звернуто увагу на причини, що обмежують зонну ефективність та частотну вибірність ЕК і, як наслідок, їх застосування в пристроях. Узагальнено різновиди та методи аподизації природних і штучних структур як загального принципу формування заданої характеристики. Розглянуто особливості аподизації ЕК та її обмеження в традиційних структурах. Сформульовано задачі дослідження.

Термін КС об'єднує напівпровідникові надґрати, фотонні та фононні кристали. Фотонні кристали радіодіапазону на основі МСЛ з періодично розміщеними неоднорідностями отримали назву ЕК. В результаті взаємодії полів падаючої та відбитих від неоднорідностей хвиль формується характерна для КС зонна частотна характеристика.

На рис. 1 представлено типові ЕК-неоднорідності. Історично перші ЕК-неоднорідності було виконано у формі наскрізних отворів 1 у заземленій поверхні та діелектричній основі 3 поряд зі смужковим провідником 2 (рис. 1, *а*). Ефективність ЕК на основі таких неоднорідностей невисока, оскільки поле сконцентроване під смужковим провідником. Найбільшого поширення набули неоднорідності на заземленій поверхні 4 у вигляді отворів різної форми під смужковим провідником (рис. 1, *б*, *в*). Контури струму на межах отвору підвищують індуктивність, що в свою чергу підвищує хвильовий імпеданс, який для лінії з розподіленими параметрами визначається формулою $Z = \sqrt{L/C}$, де L, C — погонні індуктивність та ємність. В неоднорідності на рис. 1, *в* сформовано квазісосереджену ємність, що приводить до утворення паралельного контуру. Характеристика проходження ЕК-неоднорідності має смугу подавлення — широку і вузьку режекторного типу відповідно для неоднорідності на рис. 1, *б* і 1, *в*.

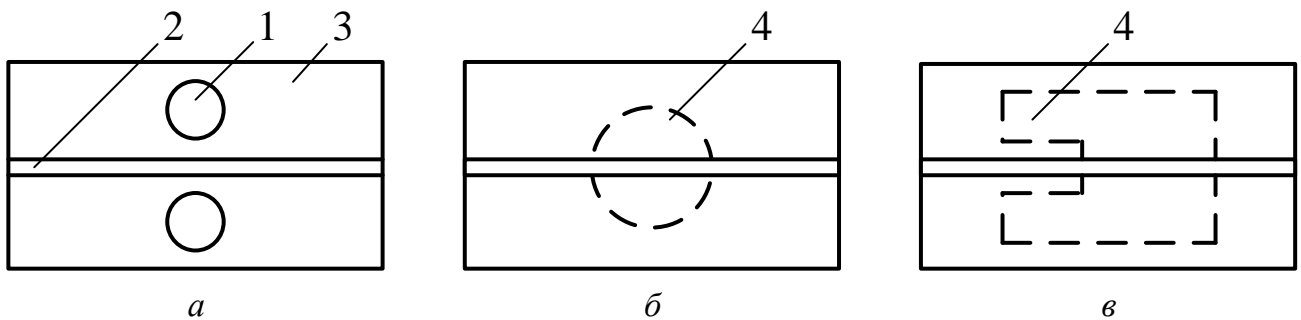


Рис. 1 Типові ЕК-неоднорідності

Оскільки такі неоднорідності мають обмежену ефективність, обумовлену обмеженістю значення ρ , то для забезпечення заданих характеристик ЕК необхідна значна кількість неоднорідностей, що збільшує габарити пристроїв.

При суттєвому (у декілька разів) збільшенні ρ суттєво зростає ефективність ЕК-пристроїв і з'явиться можливість формування високовибірних характеристик аподизацією ЕК.

У науково-технічній літературі відсутнє узагальнення аподизації як фундаментальної процедури сигнальної фільтрації та формування заданих характеристик хвильових структур, що обмежує застосування аналогій, розробку нових методів та реалізацій. У багатьох випадках цей термін взагалі не використовують.

Для узагальнення принципів аподизації та визначення особливостей аподизації ЕК розглянуто її реалізацію в різних структурах. Аподизація проявляється у зміні профілю зіниці ока, що визначає його адаптивні властивості. Термін «аподизація» означає вибір необхідної функції, яка характеризує пропускання або фільтрацію, наприклад, формування заданої функції пропускання та профілю випромінювання в оптиці, формування необхідних діаграми спрямованості антен та антенних решіток, зменшення спотворень, обумовлених обмеженістю сигналів при спектральному аналізі, формування заданих частотних характеристик цифрових нерекурсивних фільтрів та перетворювачів поверхневих акустичних хвиль.

Принципи аподизації розроблено лише для структур з однократним проходженням

або відбиттям хвиль-сигналів і вони базуються на математичному апараті надзвичайно широко уживаного перетворення Фур'є з наочним зв'язком конструкція \leftrightarrow характеристики.

КС відносяться до структур з багатократним відбиттям хвиль значної амплітуди. Таким чином, необхідно встановити можливості, умови і обмеження аподизації таких структур. Важливий аспект, яким обумовлена розробка нових реалізацій аподизації, — врахування конструктивно-технологічних обмежень.

Універсальною моделлю багатоелементних хвильових структур з однократним проходженням хвиль-сигналів є модель трансверсального фільтра (ТФ). Вхідний сигнал $U_{\text{вх}}$ розглядається як хвиля, що поширюється вздовж лінії затримки з відводами без втрат (рис. 2, тут $U_{\text{вих}}$ — вихідний сигнал ТФ; t_2, \dots, t_N — елементи затримки; h_1, \dots, h_N — вагові коефіцієнти; N — кількість відводів ТФ). Відводи забезпечують вибірку сигналу. Модель ТФ відповідає інтерференції парціальних сигналів,

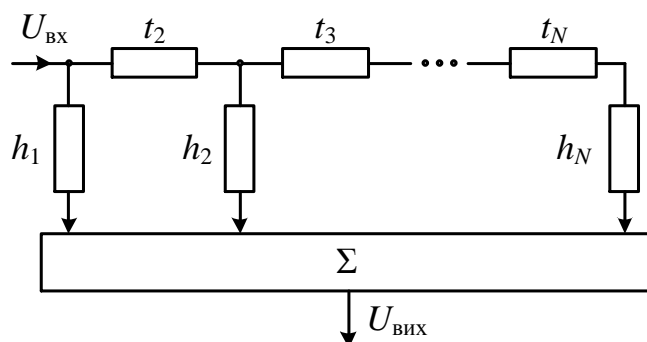


Рис. 2 Модель ТФ

кожний з яких у загальному випадку характеризується своєю амплітудою і фазою.

Частотна характеристика ТФ та часова або просторова функція, що відповідає його структурі, зв'язані перетворенням Фур'є:

$$H(f) = \sum_1^N h_n \exp(-i\varphi_n); \quad h(t) = \sum_1^N h_n \delta(t - T_n),$$

де $\varphi_n = \omega T_n$ — фазовий набіг n -ого парціального сигналу; $T_n = \sum_2^N t_n$, $T_1 = 0$, $h(t)$ —

імпульсна характеристика ТФ; $\delta(t)$ — δ -функція. Структура ТФ відповідає його імпульсній характеристиці, а значення вагових коефіцієнтів прямо пропорційні її значенням. Синтез ТФ зводиться до знаходження необхідної імпульсної характеристики оберненим перетворенням Фур'є від частотної. Аподизація багатоелементної структури виконується згідно отриманої імпульсної характеристики вибором значень $\{h_n\}$ та $\{\varphi_n\}$. У розд. 2 модель ТФ модифіковано для структур з багатократним проходженням хвиль та встановлено умови застосування цієї моделі для КС.

На основі розглянутих причин обмеження зонної ефективності ЕК, узагальнення принципів аподизації, моделі ТФ для багатоелементних структур сформульовано науково-прикладні задачі дисертації.

У розділі 2 запропоновано імпедансний підхід до моделювання ЕК та розроблено моделі ЕК на його основі. Виконано порівняння результатів імпедансного та тривимірного моделювання ЕК. На основі запропонованого підходу проаналізовано шляхи підвищення ефективності ЕК та ЕК-неоднорідностей. Запропоновано та досліджено високоефективну ЕК-неоднорідність.

Неявність зв'язку конструкція \leftrightarrow характеристики при використанні тривимірних моделей зумовлює пошук відносно простих і наочних моделей. В роботі запропоновано використання концепції імпедансу для побудови таких моделей.

Хвильовий імпеданс є узагальненим параметром хвильового процесу і характеризує силу реакції середовища на хвильове збурення. У рамках імпедансного підходу однорідні та неоднорідні області ЕК моделюються відрізками лінії передачі з різними імпедансами. Аналіз ЕК зводиться до аналізу неоднорідної лінії передачі (НЛП). Імпедансний підхід дозволяє моделювати КС різної природи. Цей підхід є основою розроблених у дисертації моделей для ЕК: ТФ, НЛП та Олінера.

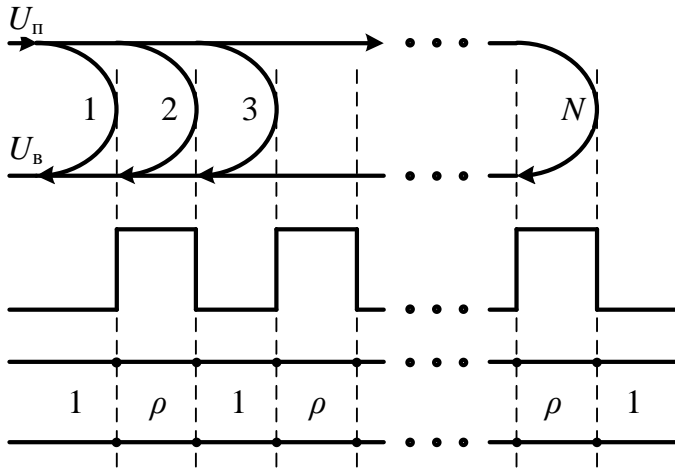


Рис. 3 Модель багатоеlementної хвильової структури

Покажемо, що при певних умовах модель ТФ можна використати і для багатоеlementних структур з багатократним відбиттям хвиль, до яких відносяться і КС. Неоднорідність КС відповідає імпедансному бар'єру або ямі (рис. 3, тут $U_{\text{п, в}}$ — амплітуди відповідно падаючої та відбитої хвиль; 1 та ρ — нормовані імпеданси зовнішнього середовища і бар'єра). Якщо коефіцієнт відбиття від структури (по модулю) R малий: $R \ll 1$ (інтерференція слабких або деструктивна інтерференція сильних

відбитих хвиль), достатньо враховувати тільки хвилі, однократно відбиті від меж бар'єрів. У цьому випадку багатоеlementну структуру з багатократним відбиттям парціальних хвиль можна розглядати як ТФ, в якому $U_{\text{вх}}$ відповідає $U_{\text{п}}$, а $U_{\text{вих}}$ — $U_{\text{в}}$. Фазовий набір парціального сигналу формується в результаті затримки окремих відбитих хвиль. Ваговий коефіцієнт h_n прямо пропорційний модулю амплітудного коефіцієнта відбиття від n -ї межі.

Модель ТФ доцільно використовувати на перших етапах аналізу і синтезу багатоеlementних структур з багатократним відбиттям хвиль, а також у смугах проходження, що відповідають дозволеним зонам КС. Ця модель встановлює безпосередній зв'язок між структурою і її характеристикою через перетворення Фур'є і дозволяє скористатися багатьма загальними для ТФ конструктивними рішеннями.

Згідно моделі НЛП ЕК моделюється неоднорідною лінією передачі. Аналіз виконується рекурентним розрахунком вхідного імпедансу вздовж лінії. В цій моделі враховано лише хвильові імпеданси відрізків, які в квазістатичному наближенні не залежать від частоти. В моделі Олінера ЕК моделюється відрізками еквівалентних прямокутних хвилеводів. Ця модель, на відміну від попередньої, враховує реактивності на межах ЕК-неоднорідностей.

Рис. 4 ілюструє взаємну відповідність частотних залежностей коефіцієнта проходження (по модулю) мікросмужкового аналога ЕК (у межах перших трьох заборонених зон (ЗЗ)), розрахованих згідно таких моделей: НЛП (1), Олінера (2) та тривимірної (3). Тривимірне моделювання виконано в середовищі MWS. Аналог ЕК утворено широкими і вузькими

відрізками смужкового провідника. Параметри структури: відносна діелектрична проникність діелектрика основи $\epsilon = 9,8$, товщина основи $h = 1$ мм, кількість відрізків (неоднорідностей ЕК) $N_n = 7$, довжина відрізків 17,19 мм, ширина — 3,92 мм і 0,1 мм (відповідно 4 і 3 відрізки); значення ρ відповідно 0,43 і 2,2.

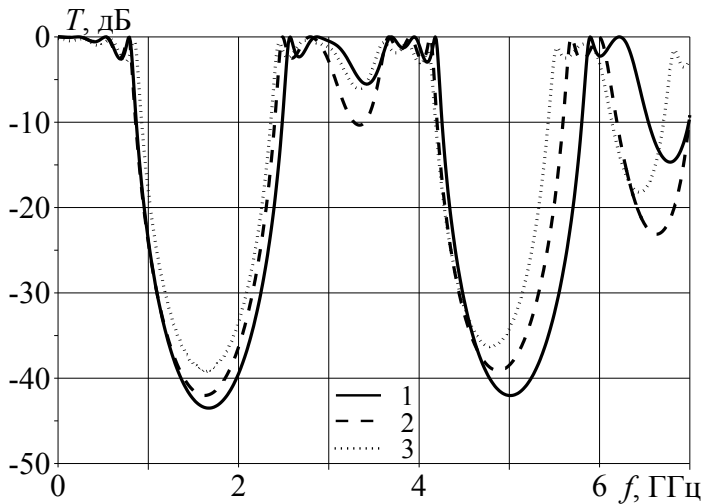


Рис. 4 Частотні залежності коефіцієнта проходження ЕК

Характеристики добре узгоджуються, особливо для нижніх зон. Як і очікувалося, залежність за моделлю Олінера ближча до результатів *MWS*.

Моделі НЛП та Олінера дозволяють проаналізувати основні особливості характеристик ЕК, що свідчить про доцільність їх використання на перших етапах проектування. Ці моделі доповнюють складні тривимірні, забезпечують наочність зв'язку конструкція ↔ характеристики, дозволяють виконати перевірку результатів моделювання.

З урахуванням запропонованих моделей проектування ЕК доцільно виконувати згідно блок-схеми, представленої на рис. 5.

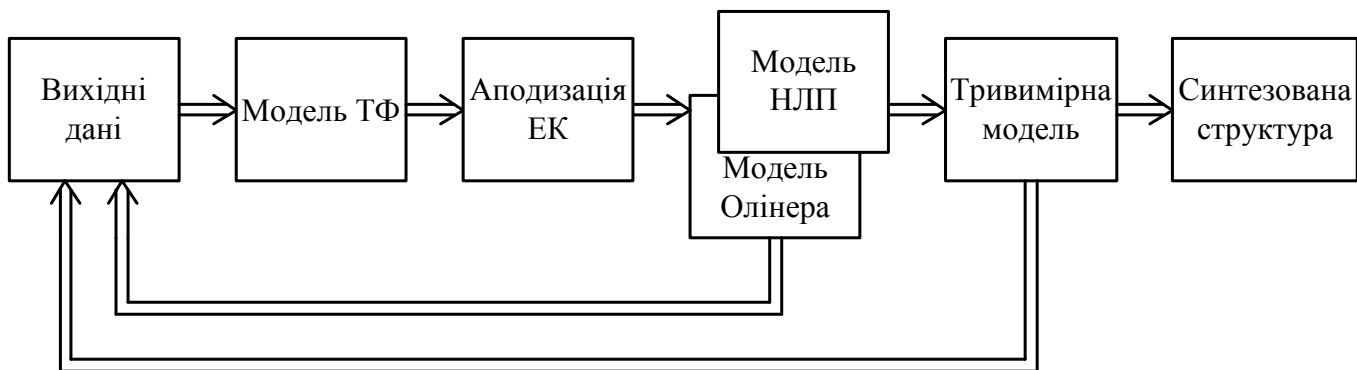


Рис. 5 Блок-схема проектування аподизованих ЕК

Імпедансний підхід дозволяє аналітично проаналізувати ефективність ЕК на прикладі модельної КС, утвореної чвертьхвильовими шарами з різними хвильовими імпедансами. Імпеданси шарів, нормовані до імпедансу зовнішнього середовища, дорівнюють 1 і $\rho > 1$. Ефективність, що характеризується розв'язкою сигналів у дозволених і заборонених зонах, визначається відношенням $K = T_{\text{макс}} / T_{\text{мін}}$, де $T_{\text{макс}}$ та $T_{\text{мін}}$ — максимальне в дозволеній зоні та мінімальне в забороненій значення T . Для необмеженої КС $T_{\text{макс}} = 1$, $T_{\text{мін}} = 0$ і $K = \infty$. Для обмеженої КС $T_{\text{мін}} = 2\sqrt{Z_{\text{вх}}} / (Z_{\text{вх}} + 1)$, де $Z_{\text{вх}} = \rho^{2N_n}$ — вхідний імпеданс КС, N_n — кількість шарів (неоднорідностей) з імпедансом ρ . Оскільки $T_{\text{макс}} \approx 1$, а $Z_{\text{вх}} \gg 1$, то $K \approx T_{\text{мін}}^{-1} \approx \rho^{N_n} / 2$.

Значення ρ визначає також і ширину ЗЗ. У випадку необмеженої модельної КС в результаті перетворень для ширини ЗЗ, нормованої до середньої частоти першої ЗЗ, отримуємо: $\Delta F = \frac{4}{\pi} \arcsin \frac{\rho-1}{\rho+1}$.

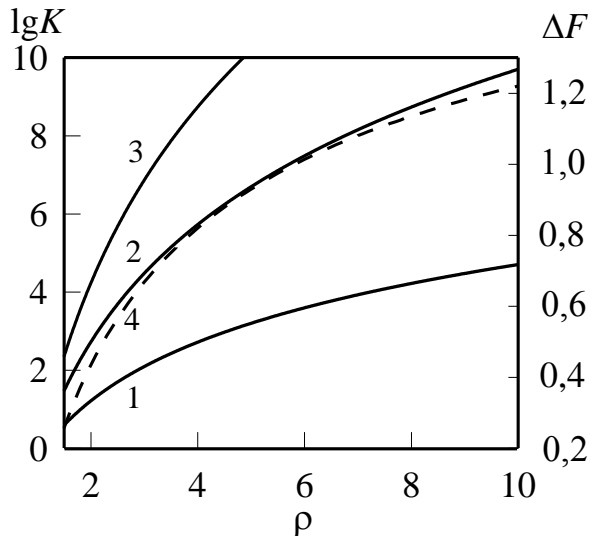


Рис. 6 Залежності розв'язки сигналів і відносної ширини забороненої зони

значення ρ до 10 суттєво підвищиться ефективність ЕК та зменшиться кількість неоднорідностей, необхідних для формування заданих характеристик пристроїв.

Для суттєвого збільшення значення ρ в дисертації запропоновано вискоефективні об'ємні ЕК-неоднорідності, названі комбінованими. Комбінована неоднорідність утворена такими неоднорідностями: 1) на металізованій поверхні; 2) у діелектричній основі; 3) на сигнальній поверхні (рис. 7, а). Неоднорідності 1 та 2 розміщено під сигнальним провідником 4, утвореним смужковим провідником 5 та навісним дротовим провідником малого діаметру 6.

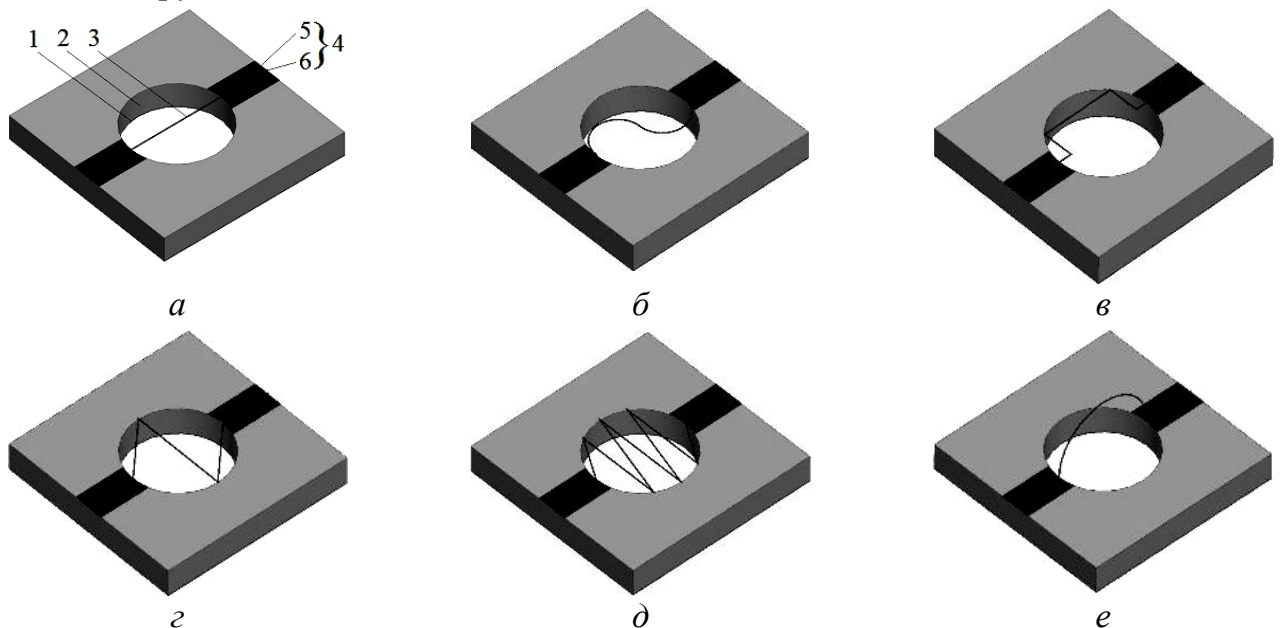


Рис. 7 Комбіновані неоднорідності з різною геометрією сигнального провідника

Така ЕК-неоднорідність є ефективним відбивачем хвиль. Розрахункові параметри комбінованих неоднорідностей з різною геометрією сигнального провідника (рис. 7) та відомої неоднорідності (рис. 1, б) приведено у табл. 1 (f_b — власна частота, що відповідає частоті максимуму коефіцієнта відбиття; ϵ_{ef} — ефективна діелектрична проникність). Конструктивні параметри неоднорідностей: неоднорідності 1 та 2 круглі діаметром $D = 8$ мм, неоднорідність 3 — провідник діаметром 0,1 мм, гальванічно зв'язаний з відрізками смужкового провідника шириною $w = 2,5$ мм, матеріал основи ФЛАН-7,2 (товщина мідної фольги $t = 50$ мкм, $h = 2,1$ мм, $\epsilon = 7$, тангенс кута діелектричних втрат 0,0015 на частоті 10 ГГц).

Як бачимо, неоднорідність 7, а в 3,7 разів ефективніша, ніж відома. На жаль, зменшення ϵ_{ef} призводить до збільшення значення f_b і, відповідно, розмірів ЕК, розрахованого на задану частоту. Непрямолінійний навісний провідник збільшує фазову довжину неоднорідності при заданому її розмірі у напрямку поширення хвилі, що підвищує

Таблиця 1

Рис неоднорідності	f_b , ГГц	ρ	ϵ_{ef}	К
1, б	5,49	1,73	3,50	1,87
7, а	7,89	6,40	1,50	1,22
7, б	6,75	6,2	4,28	2,07
7, в	4,42	5,81	5,60	2,37
7, д	3,23	5,79	12,0	3,46
7, е	6,40	7,9	4,8	2,19

значення ϵ_{ef} . Дослідження неоднорідностей з різною геометрією навісного провідника (рис. 7, б – е) виконано в розд. 4, а результати для порівняння наведено в табл. 1. У порівнянні з неоднорідністю 7, а, неоднорідність 7, д збільшує значення ϵ_{ef} у 8 разів.

При збільшенні відстані між навісним провідником і металізованою поверхнею (рис. 7, е) збільшується еквівалентне значення L і зменшується еквівалентне значення C , що приводить до підвищення Z та ρ .

В складі ЕК еквівалентне значення ρ однієї неоднорідності збільшується за рахунок бреггівського відбиття хвиль. Так, експериментальне значення ρ неоднорідності 7, а в ЕК з п'яти неоднорідностей дорівнює 10,7. Суттєве збільшення ρ комбінованими неоднорідностями дозволяє в повній мірі використати аподизацію ЕК.

У розділі 3 запропоновано методи структурної (амплітудної, крайової, фазової) аподизації ЕК на основі об'ємних неоднорідностей та нові види аподизації: імпедансну та адаптивну. Комп'ютерним моделюванням показано суттєве підвищення частотної вибірності ЕК при використанні запропонованих методів аподизації.

Амплітудна аподизація. Амплітудну аподизацію ЕК розглянуто обмежено лише в декількох публікаціях. Ваговий коефіцієнт реалізовано всім елементом (неоднорідністю) ЕК в залежності від значення коефіцієнта відбиття від неоднорідності. При такій реалізації аподизації синфазність елементів-відбивачів призводить до формування паразитних відгуків на гармонічних частотах $F=0, 2, 3, \dots$, де $F = f/f_0$, f_0 — середня частота першої ЗЗ.

В роботі запропоновано і розглянуто реалізацію вагового коефіцієнта межею неоднорідності. У цьому випадку відбивачі знакозмінні і гармонічні відгуки на частотах 0, 2, 4, ... відсутні; суттєво розширюються смуги подавлення відбитих хвиль та

зменшуються пульсації характеристик ЕК. Значення імпедансів шарів визначаються виразами: $\rho_n = \rho_{n-1}(1 \pm r_n)/(1 \mp r_n)$, $r_n = r_m \cdot h_n$, $r_m = (\rho_m - 1)/(\rho_m + 1)$, де ρ_n — імпеданс неоднорідності; r_n — модуль коефіцієнта відбиття від межі неоднорідності; h_n — ваговий коефіцієнт; ρ_m — відношення максимального імпедансу до мінімального. Аподизацію виконано згідно узагальненої функції Хеммінга: $h_n = \alpha + (1 - \alpha) \cos(\pi(N + 1 - 2n)/(N - 1))$, де $\alpha > 0,5$ — параметр, що дозволяє оптимізувати характеристику КС; n і N — номер вагового коефіцієнта і їх кількість.

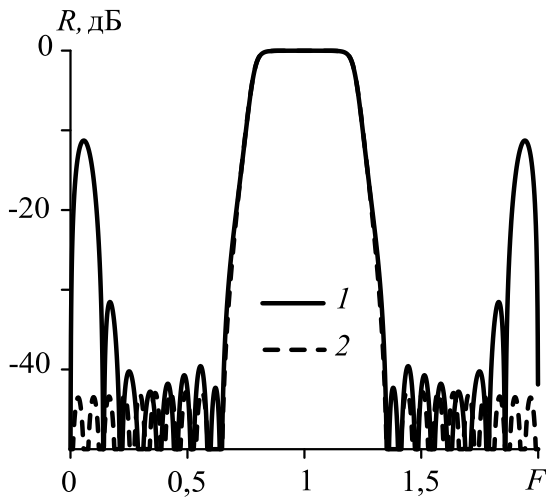


Рис.8 Частотні залежності коефіцієнта відбиття амплітудно-аподизованого ЕК

На рис. 8 представлено частотні залежності коефіцієнта відбиття ЕК, амплітудно-аподизованого відомим (1) та запропонованим (2) методами. Як бачимо, на характеристиці 2 паразитні викиди відсутні. За рахунок збільшення в два рази числа вагових коефіцієнтів підвищується точність реалізації частотної характеристики і, як наслідок, зменшується рівень бокових пелюсток. Параметри ЕК: неоднорідності чвертьхвильові, $N_n = 15$ (1 — $N=15$, 2 — $N=30$), $\rho=2$, $\alpha=0,51$.

Крайова аподизація. При крайовій аподизації параметри ЕК необхідно змінювати лише поблизу його країв. Така локально обмежена аподизація конструктивно і технологічно значно простіша за звичайну, розподілену по всій структурі. В рамках імпедансної моделі ЕК-неоднорідність можна представити еквівалентними локальними відбивачами, розміщеними на її межах. Локальні відбивачі періоду ЕК формують частотну характеристику коефіцієнту відбиття періоду $h(F)$. Сутність крайової аподизації полягає у підборі функції $h(F)$, яка визначає характер пульсацій в дозволених зонах. Рис. 9 ілюструє відповідність залежностей $R(F)$ та $h(F)$. На рис. 9, а наведено залежності для неаподизованого ЕК. Локальні відбивачі мають почергово змінну полярність і розташовані через половину часового періоду.

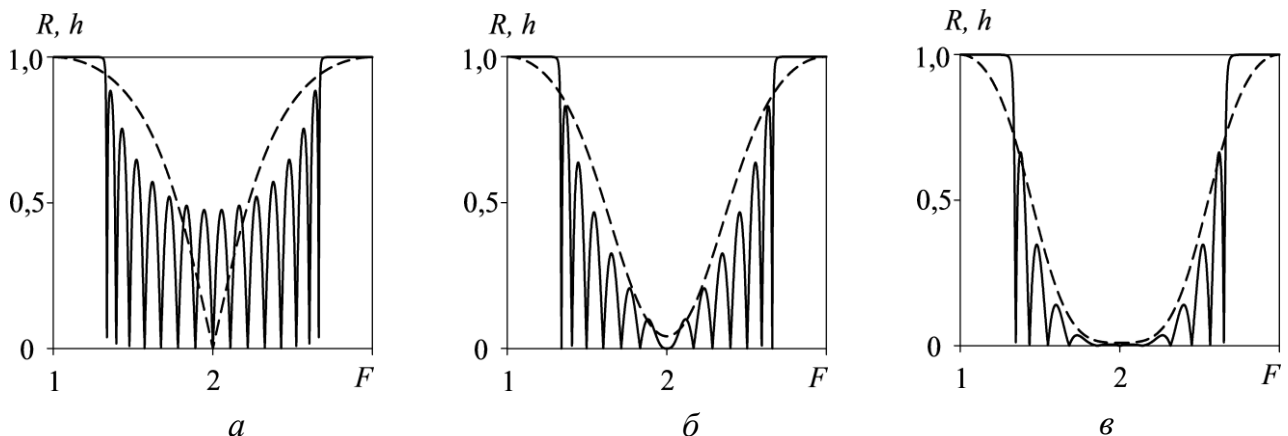


Рис. 9 Частотні залежності $R(F)$ (суцільна) та $h(F)$ (штрихова) для неаподизованого (а) та аподизованого ЕК (б — структура s_2 , в — s_4)

Степінь убунання рівня бокових пелюсток визначається степенем n характеристики $h(F) = \varphi^n(F)$. При врахуванні лише однократно відбитих хвиль $\varphi(F) = |\sin(\pi F / 2)|$. Значення $n = 1$ відповідає відомому випадку, коли відбивач періоду утворено двома протифазними локальними відбивачами. Таку структуру позначимо як $s_1 = \{r; -r\}$. Для $n > 1$ відбивач періоду повинен бути більш складним. Замінімо кожний з локальних відбивачів відбивачем зі структурою $s_1/2$. В результаті отримаємо структуру $s_2 = \{r/2; -r; r/2\}$, що відповідає $n \approx 2$. У такому ЕК змінні коефіцієнти відбиття лише двох крайніх локальних відбивачів і дорівнюють $0,5r$. Згідно моделі ТФ множник коефіцієнта відбиття дорівнює ваговому коефіцієнту локального відбивача. Значенню $n \approx 3$ відповідає структура $s_3 = \{r/4; -3r/4; 3r/4; -r/4\}$, утворена двома різнополярними структурами $s_2/2$, розташованими через часовий напівперіод. При цьому вагові коефіцієнти, відраховані від країв ЕК, дорівнюють $0,25$ та $0,75$. Для $n \approx 4$ необхідний відбивач напівперіоду зі структурою $s_4 = \{r/8; -r/2; 3r/4; -r/2; r/8\}$. Крайні вагові коефіцієнти у цьому випадку дорівнюють $0,125$; $0,5$ та $0,875$.

Рис. 9, б, в ілюструють ефективність крайової аподизації для варіантів зі структурами s_2 та s_4 ; $N_n = 8$, $\rho = 2,8$. Крайова аподизація суттєво підвищує вибірність ЕК.

Коефіцієнт проходження ЕК $T = \sqrt{1 - R^2}$. У дозволених зонах високовибірних ЕК, де $R \ll 1$, $T \approx 1 - R^2/2$. Таким чином, степінь убунання пульсацій характеристики коефіцієнта проходження визначається функцією $\varphi^{2n}(F)$ з подвоєним степенем у порівнянні з характеристикою коефіцієнта відбиття.

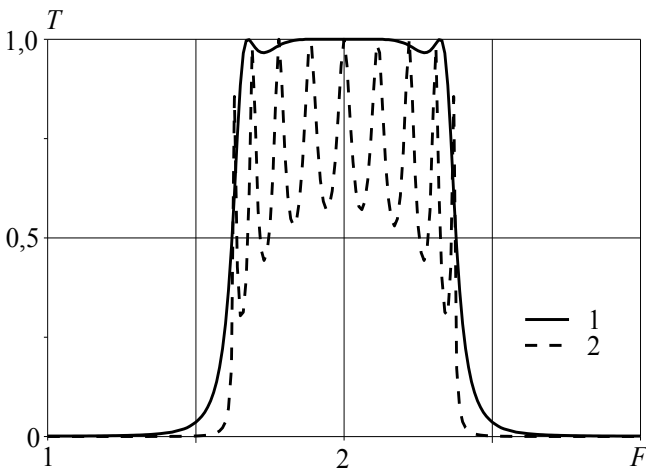


Рис. 10 Залежності коефіцієнта проходження аподизованого (1) та неаподизованого (2) ЕК

На рис. 10 наведено залежності коефіцієнта проходження аподизованого та неаподизованого ЕК; $N_n = 5$, $Z_0 = 50$ Ом, $\rho = 10$, варіант аподизації — s_4 .

Фазова аподизація. Амплітудна аподизація виконується варіацією хвильових властивостей неоднорідностей, що може суттєво обмежуватися конструктивними та технологічними можливостями. При фазовій аподизації ваговий коефіцієнт формується зміщенням локальних відбивачів з еквідистантних положень зі збереженням вихідної періодичності хвильових властивостей.

При реалізації такої аподизації необхідно врахувати такі особливості: 1) для високовибірних характеристик необхідний широкий діапазон вагових коефіцієнтів; 2) вагові коефіцієнти частотно-залежні; 3) розміри неоднорідностей мають мінімально допустимі конструктивно-технологічні обмеження.

Ці особливості враховано в запропонованих варіантах фазової аподизації, представлених на рис. 11. У варіантах *a* та *б* ваговий коефіцієнт реалізовано двома відбивачами; у *в* і *г* — відповідно трьома і двома межами відбивачів. Для компенсації частотної залежності вагових коефіцієнтів зміщення відбивачів або їх меж чергуються за напрямом. Напрямок зміщення вказано стрілкою; точка відповідає незміщеній межі відбивача; T_0 — часовий період хвилі на частоті f_0 .

Максимальний коефіцієнт відбиття забезпечують варіанти *в* та *г*. Мінімальному ваговому коефіцієнту для варіантів *a*, *б*, *г* відповідає зміщення $T_0/8$, для варіанта *в* — $T_0/6$. Мінімальні розміри елементів для варіантів *a* — *г* визначаються величинами $T_0/4$, $T_0/8$, $T_0/12$ та 0 відповідно. Найбільш високу потенційну вибірність має варіант *г*.

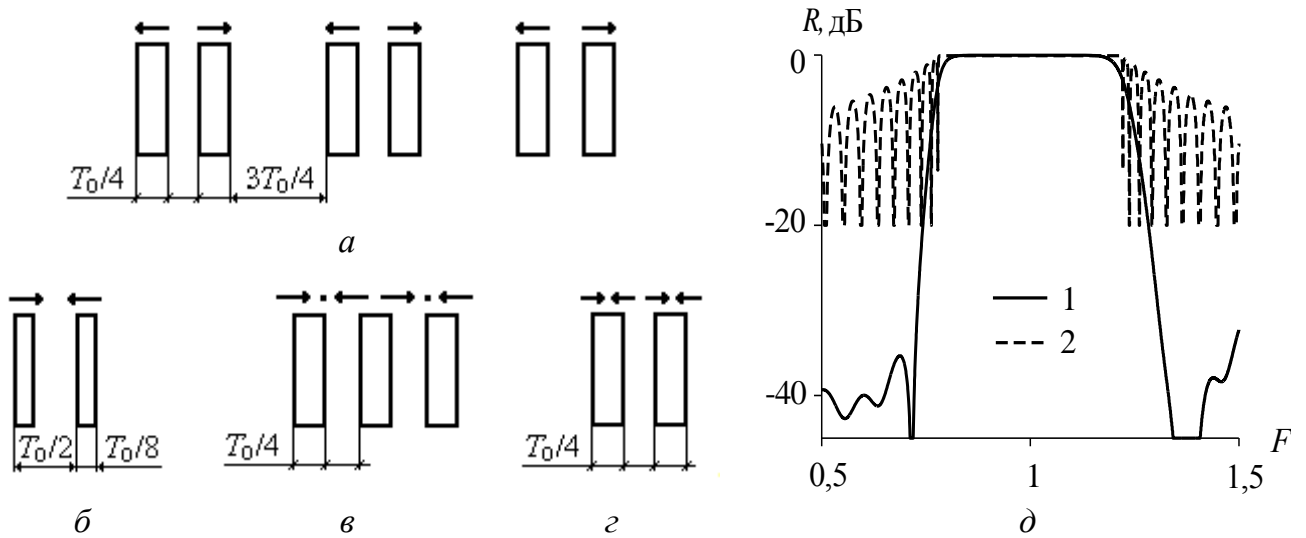


Рис. 11 Варіанти фазової аподизації (*a* — *г*) та частотні залежності коефіцієнта відбиття аподизованого (1) та неаподизованого (2) ЕК

На рис. 11, *д* приведено характеристики аподизованого за варіантом *г* та неаподизованого ЕК. Вагова функція — $f_n = \exp\{-[2(n-0,5)/N_n]^{2,4}\}$; $n = 1, 2, \dots, N_n/2$; $N_n = 20$, $\rho = 2$. Фазова аподизація забезпечує вибірність, близьку до амплітудної.

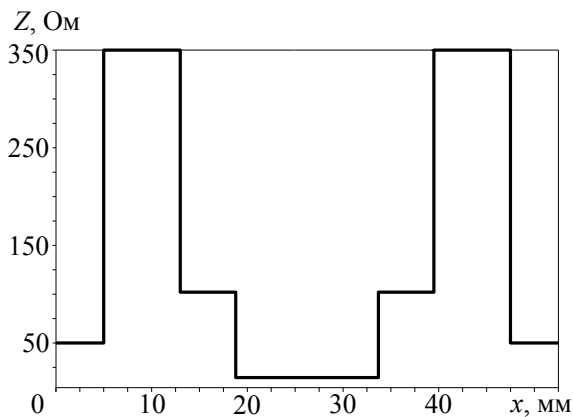


Рис. 12 Залежність хвильового імпедансу при імпедансній аподизації

Імпедансна аподизація. При імпедансній аподизації необхідно змінювати хвильові імпеданси як неоднорідностей так і однорідних областей. Ідея такої аподизації полягає у формуванні потрібного поля відбитих хвиль відповідно заданій частотній характеристиці. Так, для вузькосмугової характеристики необхідне високолокалізоване резонансне поле. На рис. 12 представлено залежність хвильового імпедансу при імпедансній аподизації вузькосмугового ЕК, дослідженого в розд. 4.

Адаптивна аподизація. Така аподизація необхідна для керованих та адаптивних радіоелектронних пристроїв. При адаптивній аподизації вагові коефіцієнти необхідно змінювати за певним алгоритмом. В роботі запропоновано адаптивну аподизацію ЕК шляхом зміни хвильових властивостей неоднорідностей, що реалізовано зміною діелектричної проникності комбінованої ЕК-неоднорідності. В кожній неоднорідності з можливістю переміщення розташовано діелектричний стрижень, що повторює форму неоднорідності.

Діелектричну проникність матеріалу стрижня ε_c обрано з умови повної компенсації впливу неоднорідності на характеристики ЕК при повному введенні стрижня:

$$\varepsilon_c = \varepsilon(0,3u^2 + 0,5u + 0,8), \quad u = \frac{w}{h}.$$

Перестроювання характеристики пристрою здійснюється переміщенням стрижнів в отворах в діапазоні $0 \leq \Delta \leq h$, де Δ — зазор між стрижнем та смужковим провідником. Діапазон перестроювання визначається діапазоном варіації відношення хвильових імпедансів різнорідних областей ЕК $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, де $\rho_{2,1}$ — максимальне та мінімальне значення ρ .

При $\Delta=0$ ЗЗ відсутні, сигнал повністю проходить з входу на вихід пристрою. У цьому випадку $\rho_1=1$. Зі збільшенням Δ зростає хвильовий імпеданс неоднорідності і, відповідно, зростає значення f_0 , ширини ЗЗ, зменшується значення T_{\min} . Максимальне значення зазору $\Delta = h$ відповідає максимальному значенню ρ_2 (отвір в заземленому шарі і наскрізний отвір в діелектрику).

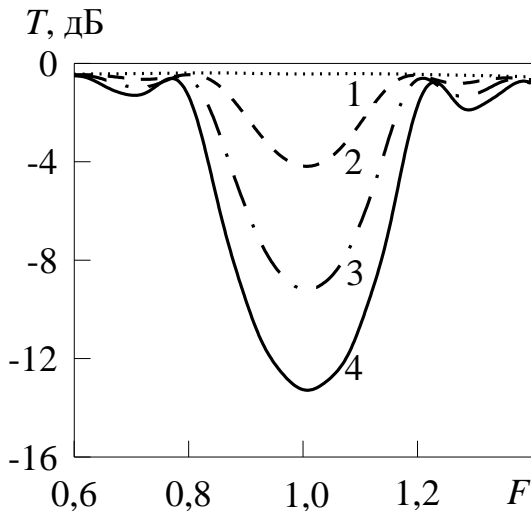


Рис. 13 Розрахункові характеристики адаптивно-аподизованого ЕК

На рис. 13 представлено розрахункові частотні залежності коефіцієнта проходження при перестроюванні такого ЕК (параметри: довжина $L = 100$ мм, ширина $B = 13$ мм, матеріал основи ФЛАН-7,2, $h = 2,1$ мм, $w = 2,5$ мм, період структури $p = 20$ мм, довжина неоднорідностей 11 мм, $N_n = 5$, $\varepsilon_c = 13$). При $\Delta = 0$ $\rho_1 = 1$, ЗЗ відсутні, $T = 1$ (залежність 1). Зі збільшенням Δ зростає хвильовий імпеданс неоднорідності і, відповідно, зростає значення f_0 , ширина ЗЗ, зменшується значення T_{\min} . Максимальне значення зазору $\Delta = h$ відповідає максимальному значенню ρ_2 (отвір в

металізованій поверхні і наскрізний отвір в діелектрику). Залежності 1-4 відповідають таким значенням відношення Δ/h : 0; 0,1; 0,3; 1 і частоти f_0 : 3,27 ГГц, 3,65 ГГц, 3,90 ГГц, 4,12 ГГц. Адаптивна аподизація суттєво розширює функціональні можливості аподизованих ЕК.

Запропоновані методи структурної та види імпедансної та адаптивної аподизації дозволяють помітно підвищити частотну вибірність та розширити функціональність пристроїв на основі ЕК та інших КС.

У розділі 4 комп'ютерним моделюванням досліджено ефективність ЕК-неоднорідностей. Запропоновано мікросмужкові об'ємні комбіновані ЕК-неоднорідності, що забезпечують високу зонну вибірність ЕК і дозволяють в повній мірі використати аподизацію для формування високої частотної вибірності таких структур. Розроблено, виготовлено та експериментально досліджено конструкції аподизованих ЕК на основі об'ємних неоднорідностей та ЕК-пристроїв з характеристиками різних типів.

В дисертації вперше запропоновано високоефективні комбіновані ЕК-неоднорідності. Комбінована неоднорідність складається з таких видів неоднорідностей: 1) на металізованій поверхні; 2) у діелектричній основі; 3) на сигнальній поверхні. Порівнюємо ефективність кожного з цих видів неоднорідностей.

Параметри експериментального ЕК: вид неоднорідностей — 1, $L = 110$ мм, $B = 13$ мм, $w = 2,5$ мм, $N_H = 5$, $p = 20$ мм, діаметр отворів $D = 8$ мм, матеріал основи ФЛАН-7,2, $h = 2,1$ мм, $Z_0 = 50$ Ом.

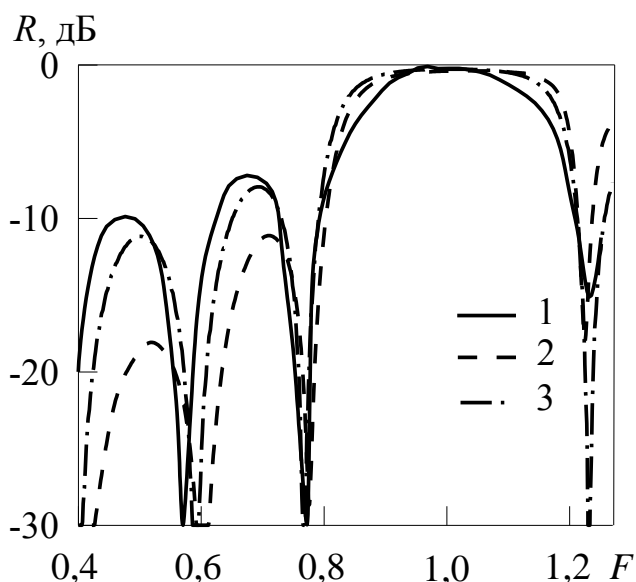


Рис. 14 Експериментальна (1) і розрахункові (2, 3) частотні залежності коефіцієнта відбиття ЕК з отворами в металізованій поверхні.

На рис. 14 наведено характеристики, що ілюструють зонну вибірність такого ЕК. Залежність 2 розраховано у середовищі MWS, 3 — згідно імпедансної моделі. Краща відповідність залежності 3 експериментальній характеристиці пояснюється тим, що параметри імпедансної моделі обрано з експериментальної характеристики. Імпедансна модель дозволяє розрахувати значення $\rho = 1,7$. Експериментальні і розрахункові значення f_0 і T_{\min} відповідно дорівнюють 3,43 ГГц і 3,57 ГГц; $-10,4$ дБ і $-16,0$ дБ.

Експериментальні і розрахункові значення f_0 і T_{\min} для ЕК з неоднорідностями видів 1 і 2 ($D = 8,6$ мм, глибина отворів — 1,6 мм) відповідно дорівнюють 3,93 ГГц і 3,98 ГГц; $-20,9$ дБ і $-28,4$ дБ. Експериментальне значення ширини $3\Delta F$ збільшилося з 46 % до 53 %. Значення $\rho = 2,6$, при максимальній глибині отвору $\rho = 3,8$, збільшення відповідно в 1,5 і 2,2 рази.

Неоднорідності на сигнальній поверхні виконаємо періодичною варіацією ширини смужкового провідника. У випадку отворів у діелектрику максимальної глибини і ширини провідника над отворами 0,1 мм розрахункове значення T_{\min} зменшується з -16 дБ до -63 дБ, а значення ΔF збільшується з 45% до 85%. Максимальне значення $\rho = 10,7$. Неоднорідності 2 і 3 збільшують значення ρ у 6,3 рази. За рахунок лише варіації ширини

смушкового провідника $\rho = 2,5$. Як бачимо, комбіновані неоднорідності дозволяють суттєво підвищити вибірність ЕК.

На рис. 15 представлено експериментальні (1, 3, 5) та розрахункові (2, 4) частотні залежності коефіцієнтів відбиття (1, 2) і проходження (3, 4, 5) ЕК на основі комбінованих неоднорідностей. На відміну від наведених вище параметрів, $D = 6$ мм, варіація смушкового провідника — 6 мм/0,1 мм. Вузькі відрізки сигнального провідника виконано

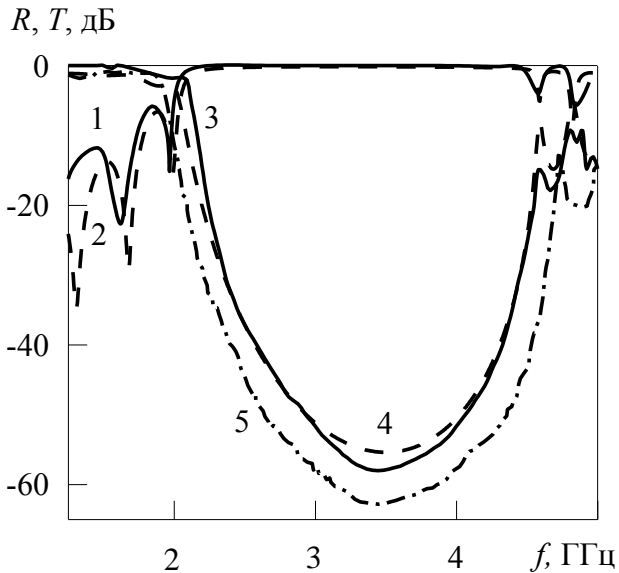


Рис. 15 Залежності коефіцієнтів відбиття і проходження ЕК на основі комбінованих неоднорідностей.

досліджено малогабаритний вузькосмуговий фільтр на основі комбінованих ЕК-неоднорідностей (вставка на рис. 16, а). Фільтр утворено п'ятьма хвильовими областями: дві комбіновані ЕК-неоднорідності 1, відрізок широкого 2 та два відрізки вузького 3 сигнального провідника. Ці області формують трирівневу відносну імпедансну залежність (рис. 12). Конструктивні параметри фільтра: $L = 52,5$ мм, $B = 13$ мм, ширина 50-омних відрізків смушкового провідника 1,1 мм, D та ширина внутрішнього відрізка смушкового провідника 8 мм, діаметр дротового провідника 0,1 мм, довжина вузького і широкого відрізків сигнального провідника відповідно 5,8 мм і 14,9 мм, матеріал основи — Rogers RO3010 ($\epsilon = 10,2$, $h = 1,28$ мм, $t = 35$ мкм; тангенс кута діелектричних втрат — 0,0015 на частоті 10 ГГц).

На рис. 16, а представлено експериментальну (1) та розрахункову (2) амплітудно-частотні характеристики фільтра. Розрахунок проведено згідно блок-схеми на рис. 5. Експериментальні та розрахункові значення: середня частота: 3,14 ГГц та 3,28 ГГц; ширина смуги пропускання за рівнем -3 дБ: 87 МГц та 89 МГц; внесені втрати 2,6 дБ та 2,0 дБ; добротність: 36,1 та 36,8.

Значення Z і ϵ_{ef} зовнішніх відрізків смушкового провідника, ЕК-неоднорідності, вузького і широкого відрізків сигнального провідника відповідно дорівнюють 50 Ом; 350 Ом; 102 Ом та 14,5 Ом і 6,7; 1,5; 5,9 та 8,3 (рис. 12). Відносно хвильових імпедансів

дротовим провідником, приєднаним до широких смушкових відрізків. На вставці показано структуру ЕК: 1 — отвір в металізованій поверхні і діелектрику, 2 — навісний провідник, 3 — відрізок смушкового провідника. Характеристики 1–4 — отвори в металізованій поверхні закриті мідною фольгою, 5 — відкриті. Розрахунок виконано у середовищі MWS.

Для характеристики 5 $T_{\text{мін}} = -62$ дБ, $f_0 = 3,49$ ГГц, $\Delta F = 85\%$. Відношення імпедансів різнорідних областей ЕК дорівнює 17,5 (за рахунок варіації ширини провідника лише 4,2).

В роботі запропоновано та

зовнішніх та внутрішніх відрізків смужкового провідника значення ρ ЕК-неоднорідності дорівнює відповідно 7 та 24.

На рис. 16 б, в представлено розраховане у середовищі *MWS* електричне поле у середньому перерізі діелектричної основи на середній частоті і на частоті 2,23 ГГц. Рис. 16, б ілюструє резонансну локалізацію поля у напівхвильовій області, яка відповідає внутрішньому відрізку смужкового провідника. Резонансна стояча хвиля компенсує хвильові неоднорідності структури, так що падаюча хвиля резонансно проходить її. Без врахування втрат при резонансному проходженні хвилі амплитуди падаючої хвилі та хвилі, що пройшла, однакові. У даному випадку втрати малі. Розподіли поля на зовнішніх відрізках смужкового провідника ілюструють резонансне проходження хвилі. Поле на рис. 16, в відповідає максимальному коефіцієнту відбиття. За рахунок високої ефективності ЕК-неоднорідності поле практично не проникає в структуру. Як видно з розподілів поля, не зважаючи на те, що діаметр провідника набагато менший діаметра отвора ЕК-неоднорідності, вся ЕК-неоднорідність впливає на формування поля структури.

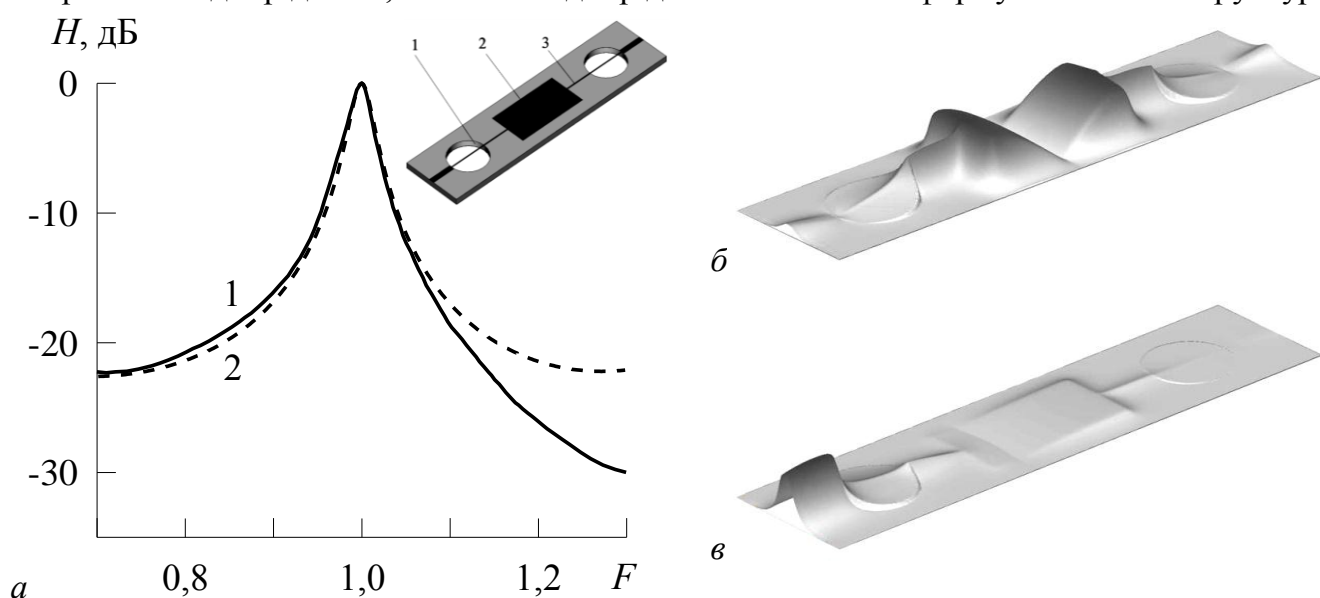


Рис. 16 Амплітудно-частотні характеристики вузькосмугового фільтра на основі комбінованих неоднорідностей (*a*) та напруженість електричного поля (по модулю) на середній частоті (*б*) і на частоті мінімуму коефіцієнта проходження (*в*)

ВИСНОВКИ

1. Запропонований і розроблений імпедансний підхід забезпечує наочність зв'язку конструкція електромагнітного кристалу (ЕК) \leftrightarrow характеристики ЕК, дозволяє з єдиних позицій моделювати не лише ЕК, але й інші кристалоподібні структури (КС). Моделі неоднорідної лінії передачі та Олінера дозволяють проаналізувати основні особливості характеристик ЕК; їх доцільно використовувати на перших етапах проектування перед складним тривимірним моделюванням. Модель трансверсального фільтра застосовна в дозволених зонах ЕК, що забезпечує її використання для синтезу і аподизації таких структур.

2. Запропоновані та досліджені об'ємні комбіновані неоднорідності у порівнянні з типовими ЕК-неоднорідностями дозволяють збільшити максимальне значення хвильового імпедансу z , приблизно, 200 Ом до 550 Ом. Модифікації цих неоднорідностей зі збільшеною фазовою довжиною забезпечують підвищення ефективної діелектричної проникності $\epsilon_{\text{еф}}$ з 1,5 до 12, що відповідає зменшенню розмірів ЕК, розрахованого на задану частоту, в $\sqrt{\epsilon_{\text{еф}}}$ раз.

3. Запропонований метод амплітудної аподизації КС з реалізацією значення вагового коефіцієнта межею неоднорідності помітно знижує пульсації характеристики КС і розширює смуги подавлення відбитих хвиль. Розроблений метод крайової аподизації забезпечує суттєве підвищення вибірності ЕК без помітного конструктивного ускладнення, що має першочергове значення для високоефективних, технологічних пристроїв на основі ЕК. Запропоновані реалізації високовибірної фазової аподизації КС враховують конструктивно-технологічні обмеження виробництва. Розроблені нові види аподизації — адаптивна та імпедансна — суттєво розширюють можливості ЕК, наприклад, в створенні керованих та адаптивних радіоелектронних пристроїв.

4. ЕК на основі комбінованих неоднорідностей дозволяють сформувати високу зонну вибірність при числі неоднорідностей не більше 5. Експериментально досягнуто найвищих для коротких ЕК значень параметрів: подавлення сигналу -62 дБ на середній частоті 3,49 ГГц при відносній смузі 85% та відношенні імпедансів різнорідних областей 17,5.

5. Запропоновано та досліджено малогабаритний вузькосмуговий імпедансно аподизований ЕК-фільтр з шириною смуги пропускання за рівнем -3 дБ 87 МГц, добротністю 36,1 та внесеними втратами 2,6 дБ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

За темою дисертації опубліковано 24 наукові роботи:

1. Тимофеева (Адаменко) Ю. Ф. Повышение зонной избирательности микрополосковых аналогов фотонных кристаллов / Назарько А. И., Тимофеева Ю. Ф., Нелин Е. А., Попсуй В. И. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 6. — С. 38—41.

(Виконано оцінку зонної вибірності КС, розглянуто методи підвищення вибірності ЕК, проведено експериментальні дослідження, виконано обробку отриманих даних).

2. Патент України на корисну модель UA 53885 U, МПК 2009) H01P 3/08 Фотоннокристалічний пристрій / Тимофеева (Адаменко) Ю. Ф.; Назарько А. І.; Нелин Е. А., Попсуй В. І. — U201003531; заявл. 26.03.2010; опубл. 25.10.2010; Бюл. №20.

(Виконано комп'ютерне моделювання та експериментальне дослідження технічного рішення).

3. Тимофеева (Адаменко) Ю. Ф. Анализ эффективности неоднородностей кристаллоподобных структур / Назарько А. И., Тимофеева Ю. Ф. // Радиоэлектроника в XXI столетии. Материалы III научно-технической конференции студентов, аспирантов та молодых ученых радиотехнического факультета НТУУ «КПІ». — 2009. — С. 117—119.

(Виконано комп'ютерне моделювання при аналізі зонної вибірності КС).

4. Тимофєєва (Адаменко) Ю. Ф. Проектування частотного фільтра з кристалоподібними неоднорідностями / Назарько А. І., Тимофєєва Ю. Ф. // Радіоелектроніка в ХХІ столітті. Матеріали IV науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених радіотехнічного факультету НТУУ «КПІ». — 2010. — С. 123—126.

(Виконано комп'ютерне моделювання при поетапному синтезі малогабаритного частотного фільтра на основі ЕК-неоднорідностей.)

5. Тимофєєва (Адаменко) Ю. Ф. Вплив форми неоднорідностей на характеристики Електромагнітних кристалів / Купріна А. Д., Назарько А. І., Тимофєєва Ю. Ф. // Радіоелектроніка в ХХІ столітті. Матеріали IV науково-технічної конференції Студентів, аспірантів та молодих вчених радіотехнічного факультету НТУУ «КПІ». — 2010. — С. 99—102.

(Виконано комп'ютерне моделювання ЕК-пристроїв з неоднорідностями різної форми).

6. Timofeeva (Adamenko) J. High Selective Photon Crystal Structures / Nazarko A., Timofeeva J., Nelin E. // X International Conference “The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics”. — Lviv-Polyana, Ukraine. — 2009. — P. 116—117.

(Виконано комп'ютерне моделювання підвищення зонної вибірності КС, проведено комп'ютерне та експериментальне дослідження ЕК).

7. Timofeeva (Adamenko) J. Devices on apodized electromagnetic crystals// XI International Conference “The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics” — Lviv-Polyana, Ukraine — 2011. — P. 88 — 90.

(Виконано аналіз застосування аподизації в різних технічних областях, показано ефективність аподизації для формування заданих характеристик ЕК-пристроїв.)

8. Timofeeva (Adamenko) J. High efficiency electromagnetic crystal / Nazarko A., Nelin E., Timofeeva J. // XII international conference for young researchers “Wave Electronics and its Applications in the Information and Telecommunication Systems”. — St. Petersburg, Russia. — 2009. — P. 45.

(Виконано одновимірне комп'ютерне моделювання ЕК).

9. Тимофєєва (Адаменко) Ю. Ф. Пристрої фільтрації на основі електромагнітних кристалів / Назарько А. І., Тимофєєва Ю. Ф. // 14-й міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ ст.» Зб. Матеріалів форуму. — Харків: ХНУРЕ — 2010. — ч.1 — С. 145.

(Виконано комп'ютерне дослідження ефективності різних типів неоднорідностей).

10. Тимофєєва (Адаменко) Ю. Ф. Пристрої фільтрації на основі аподизованих електромагнітних кристалів // 15-й міжнародний молодіжний форум "Радіоелектроніка і молодь в ХХІ ст." Зб. матеріалів форуму. — Харків: ХНУРЕ — 2011. — т.1 — С. 37.

(Виконано комп'ютерне моделювання аподизованих ЕК-пристроїв, проілюстровано ефективність аподизації для формування заданих характеристик ЕК-пристроїв.)

11. Тимофеева (Адаменко) Ю. Ф. Микрополосковый частотный фильтр на основе

кристаллоподобных неоднородностей / Назарько А. И., Тимофеева Ю. Ф. // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2010»: Материалы 6-ой междунар. Молодежной науч.-техн. Конф. — Севастополь: Изд-во севнту. — 2010. — С. 181.

(Виконано комп'ютерне моделювання та експериментальне дослідження ЕК-фільтра на основі високоімпедансних неоднорідностей).

12. Тимофеева (Адаменко) Ю. Ф. Моделювання мікросмужкового аналога фотонного кристала / Назарько А. И., Тимофеева Ю. Ф., Нелін Є. А., Иванов О. М. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія — Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2008. — Вип. 36. — С. 101—103.

(Виконано перевірку адекватності одновимірного моделювання мікросмужкового аналога фотонного кристалу за імпедансною моделлю та моделлю Олінера).

13. Тимофеева (Адаменко) Ю. Ф. Ефективність неоднорідностей електромагнітних кристалів / Назарько А. И., Тимофеева Ю. Ф., Нелін Є. А. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія — Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2010. — Вип. 40. — С. 141—143.

(Проаналізовано ефективність поодиноких та подвійних ЕК-неоднорідностей комп'ютерним моделюванням за одновимірними моделями).

14. Тимофеева (Адаменко) Ю. Ф. Высокоизбирательный электромагнитный кристалл / Назарько А. И., Нелін Е. А., Попсуй В. И., Тимофеева Ю. Ф. // Журнал технической физики. — 2010. — Т. 80 — Вып. 4. — С. 138—139. (іноземне видання)

(Виконано синтез високовибірною ЕК на основі комбінованих неоднорідностей, проведено експериментальні дослідження).

15. Тимофеева (Адаменко) Ю. Ф. Узкополосный частотный фильтр на основе кристаллоподобных неоднородностей / Назарько А. И., Нелін Е. А., Попсуй В. И., Тимофеева Ю. Ф. // Журнал технической физики. — 2010. — Т. 80 — Вып. 10. — С. 148—149. (іноземне видання)

(Виконано синтез вузькосмугового НВЧ фільтра на основі ЕК-неоднорідностей, проведено експериментальні дослідження).

16. Тимофеева (Адаменко) Ю. Ф. Взаємодія електромагнітного поля з неоднорідностями електромагнітних кристалів / Назарько А. И., Тимофеева Ю. Ф., Нелін Є. А. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія — Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2010. — Вип. 41. — С. 65—68.

(Досліджено комп'ютерним моделюванням ефективність різних типів неоднорідностей ЕК).

17. Тимофеева (Адаменко) Ю. Ф. Электромагнитные кристаллы на основе низкоомных неоднородностей / Назарько А. И., Нелін Е. А., Попсуй В. И., Тимофеева Ю. Ф. // Журнал технической физики. — 2011. — Т. 81 — Вып. 5. — С. 142—143. (іноземне видання)

(Виконано комп'ютерне моделювання запропонованих ЕК на основі низькоімпедансних неоднорідностей, виконано експериментальні дослідження).

18. Тимофеева (Адаменко) Ю. Ф. Двухфазный электромагнитный кристалл / Назарько А. И., Нелін Е. А., Попсуй В. И., Тимофеева Ю. Ф. // Письма в Журнал технической физики. — 2011. — Т. 37 — Вып. 4. — С. 81—86. (іноземне видання)

(Запропоновано новий вид аподизації (імпедансн) для ЕК, розглянуто її реалізацію на

основі двофазних ЕК).

19. Патент України на корисну модель UA 43888 U, МПК (2009) H01P 3/08 Фотоннокристалічний пристрій / Тимофєєва (Адаменко) Ю. Ф.; Назарько А. І.; Нелін Є. А. — U200901849; заявл. 02.03.2009.; опубл. 10.09.2009; Бюл. №17.

(Виконано комп'ютерне моделювання технічного рішення).

20. Патент України на корисну модель UA 47242 U, МПК (2009) H01P 3/08 Фотоннокристалічний пристрій / Тимофєєва (Адаменко) Ю. Ф.; Назарько А. І.; Нелін Є. А. — U200907359; заявл. 13.07.2009; опубл. 25.01.2010; Бюл. №2.

(Виконано комп'ютерне моделювання технічного рішення ЕК-пристрою з низькоімпедансними неоднорідностями)

21. Патент України на корисну модель UA 55752 U, МПК (2011.01) H01P 3/00 Фотоннокристалічний пристрій з протифазними хвильовими неоднорідностями / Тимофєєва (Адаменко) Ю. Ф.; Назарько А. І.; Нелін Є. А., Попсуй В. І. — U201006791; заявл. 01.06.2010; опубл. 27.12.2010; Бюл. №24.

(Виконано комп'ютерне моделювання).

22. Патент України на корисну модель UA 64315 U, МПК (2011.01) H01P 3/00 Електромагнітнокристалічний відбивач / Назарько А. І., Нелін Є. А., Тимофєєва (Адаменко) Ю. Ф. — U201102535; заявл. 03.03.2011; опубл. 10.11.2011; Бюл. №21.

(Виконано комп'ютерне моделювання ЕК-відбивачів на основі високоімпедансних неоднорідностей).

23. Патент України на корисну модель UA 78246 U, МПК (2013.01) H01P 3/00 Електромагнітнокристалічний відбивач / Назарько А. І., Нелін Є. А., Попсуй В. І., Тимофєєва (Адаменко) Ю. Ф. — U201211068; заявл. 24.09.2012; опубл. 11.03.2013; Бюл. №5.

(Виконано комп'ютерне моделювання ЕК-відбивачів на основі високоімпедансних неоднорідностей).

24. Патент України на винахід UA 97425 U, МПК (2012.01) H01P 3/00 Фотоннокристалічний пристрій з протифазними хвильовими неоднорідностями / Тимофєєва (Адаменко) Ю. Ф.; Назарько А. І.; Нелін Є. А., Попсуй В. І. — a201006790; заявл. 01.06.2010; опубл. 10.02.2012; Бюл. №3.

(Запропоновано новий вид аподизації (імпедансу) для ЕК, розглянуто її реалізацію на основі двофазних ЕК, виконано комп'ютерне моделювання технічного рішення).

АНОТАЦІЯ

Адаменко Ю. Ф. "Пристрої фільтрації на основі аподизованих електромагнітних кристалів". — Рукопис.

Дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.12.13 — радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій. — Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", Київ, 2014.

У дисертаційній роботі проаналізовано чинники, що обмежують ефективність електромагнітних кристалів (ЕК) та застосування аподизації для створення високовибірних ЕК.

Розроблені імпедансний підхід до моделювання ЕК та моделі ЕК забезпечують наочність зв'язку конструкція ↔ характеристики, необхідну для продуктивного проектування ЕК-пристроїв.

Запропоновані та досліджені об'ємні комбіновані неоднорідності у порівнянні з типовими ЕК-неоднорідностями дозволяють збільшити максимальне значення хвильового імпедансу з приблизно з 200 Ом до 550 Ом. Модифікації цих неоднорідностей зі збільшеною фазовою довжиною забезпечують підвищення $\epsilon_{\text{еф}}$ з 1,5 до 12, що відповідає зменшенню розмірів ЕК, розрахованого на задану частоту.

Проаналізовано особливості аподизації типових ЕК, виконано узагальнення принципів аподизації в природних та штучних структурах, що дозволило розробити методи структурної (амплітудної, фазової, крайової) аподизації ЕК на основі об'ємних неоднорідностей та нові види (імпедансної та адаптивної) аподизації ЕК.

ЕК на основі комбінованих неоднорідностей дозволяють сформуванню високу зонну вибірність при невеликій кількості неоднорідностей. Експериментальні дослідження макета високовибірною ЕК на основі запропонованих комбінованих неоднорідностей підтвердили досягнення найвищих значень параметрів ЕК при п'яти неоднорідностях: подавлення сигналу на 62 дБ на частоті 3,49 ГГц при відносній смузі 85%. Відношення імпедансів різномірних областей ЕК дорівнює 17,5.

Запропоновано та досліджено малогабаритний вузькосмуговий фільтр на основі комбінованих ЕК-неоднорідностей з імпедансною аподизацією добротністю в 36,1, шириною смуги пропускання за рівнем -3 дБ 87 МГц та внесеними втратами 2,6 дБ.

Ключові слова: кристалоподібна структура, електромагнітний кристал, заборонена зона, неоднорідність, аподизація, амплітудна аподизація, фазова аподизація, крайова аподизація, високоефективні пристрої фільтрації.

АННОТАЦИЯ

Адаменко Ю. Ф. "Устройства фильтрации на основе аподизованных электромагнитных кристаллов". — Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 — радиотехнические устройства и средства телекоммуникаций. — Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", Киев, 2014.

В диссертационной работе проанализированы факторы, ограничивающие эффективность электромагнитных кристаллов (ЭК) и использование аподизации для создания высокоэффективных ЭК.

Разработанный импедансный подход к моделированию ЭК и модели ЭК обеспечивают наглядность связи конструкция ↔ характеристики, которая необходима для продуктивного проектирования ЭК-устройств.

Предложенные и исследованные объемные комбинированные неоднородности в сравнении с типичными ЭК-неоднородностями позволяют увеличить максимальное значение волнового импеданса приблизительно с 200 Ом до 550 Ом. Модификации этих

неоднородностей с увеличенной фазовой длиной обеспечивают повышение $\varepsilon_{\text{эф}}$ с 1,5 до 12, что соответствует уменьшению размеров ЭК, рассчитанного на заданную частоту.

Проанализированы особенности аподизации типовых ЭК, выполнено обобщение принципов аподизации в естественных и искусственных структурах, что позволило разработать методы структурной (амплитудной, фазовой, краевой) аподизации ЭК на основе объемных неоднородностей и новые виды (импедансной и адаптивной) аподизации ЭК.

ЭК на основе комбинированных неоднородностей позволяют сформировать высокую зонную избирательность при небольшом числе неоднородностей. Экспериментальные исследования макета високоизбирательного ЭК на основе предложенных комбинированных неоднородностей подтвердили достижение наивысших значений параметров ЭК при пяти неоднородностях: подавление сигнала на 62 дБ на частоте 3,49 ГГц при относительной полосе 85%. Отношение импедансов разнородных областей ЭК равно 17,5.

Предложен и исследован малогабаритный узкополосный фильтр на основе комбинированных ЭК-неоднородностей с импедансной аподизацией, добротностью 36,1, шириной полосы пропускания по уровню -3 дБ 87 МГц и вносимыми потерями 2,6 дБ.

Ключевые слова: кристаллоподобные структуры, электромагнитный кристалл, запрещенная зона, неоднородность, аподизация, амплитудная аподизация, фазовая аподизация, краевая аподизация, высокоэффективные устройства фильтрации.

ANNOTATION

Adamenko Yu. F. "Filtering devices based on apodized electromagnetic crystals". — Manuscript.

Dissertation on competition of graduate degree of candidate of technical sciences by specialty 05.12.13 — radio engineering devices and means of telecommunications. — National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2014.

The limiting factors of electromagnetic crystals (EC) efficiency and the use of apodization for creating highselective EC are analyzed in thesis.

Designed impedance modeling approach of EC and EC models provide visibility of structure \leftrightarrow characteristics connection needed for productive design of EC devices.

Proposed and investigated the combined bulk inhomogeneities compared to typical EC-irregularity increase the maximum value of wave impedance from about 200 ohms to 550 ohms. Modifications of these inhomogeneities with increased phase length providing improvement of $\varepsilon_{\text{эф}}$ from 1.5 to 12, which corresponds to the reduction in the size of EC, calculated for a given frequency.

The features typical EC apodization are analyzed, the apodization principles generalization in natural and man-made structures are done, which allowed to develop the methods of structural (amplitude, phase, edge) apodization of EC and the new one (adaptive and impedance).

EC based on combined inhomogeneity allow to create high band selectivity in a small number of inhomogeneities. Experimental research of highselectivity EC layout based on the proposed combined inhomogeneities confirmed the achievement of the highest values of EC

parameters in five irregularities: attenuation 62 dB at frequency 3.49 GHz with a relative bandwidth of 85%. Impedance ratio of dissimilar EC areas equals 17.5.

Proposed and investigated compact narrowband filter based on the combined EC inhomogeneities with impedance apodization gives quality factor in 36.1 with a bandwidth at -3 dB level equals 87 MHz and with loss 2.6 dB.

Keywords: crystal-like structure, electromagnetic crystal, band gap, inhomogeneity, apodization, amplitude apodization, phase apodization, edge apodization, high efficiency filtration devices.