

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ЛІЩИНОВСЬКА НАТАЛІЯ ОЛЕКСАНДРІВНА**



УДК 621.396.69

**МЕТОД СИНТЕЗУ РОЗПОДІЛЕНИХ ВИСОКОДОБРОТНИХ  
РЕЗОНАТОРІВ З РОЗРІДЖЕНИМ ДІАПАЗОНОМ ЧАСТОТ  
ДЛЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ ТА ЗАСОБІВ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**

05.12.13 – «Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій»

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор  
**Козловський Валерій Валерійович**,  
Національний авіаційний університет,  
завідувач кафедри засобів захисту інформації

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Климаш Михайло Миколайович**,  
Національний університет «Львівська Політехніка»,  
завідувач кафедри телекомунікацій;

доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Наконечний Володимир Сергійович**,  
Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка,  
професор кафедри кібербезпеки  
та захисту інформації.

Захист відбудеться «18» березня 2021 року о 15<sup>00</sup> годині, ауд. 6.205 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.19, у Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України за адресою: 03058, Україна, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, Україна, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

Автореферат розісланий «18» лютого 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.062.19  
доктор технічних наук, доцент



Р. С. Одарченко

Підп. до друку 17.02.2021. Формат 60x84/16. Папір офс.  
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 1,25.  
Тираж 100 пр. Замовлення № 18-1.

Видавець і виготівник  
Національний авіаційний університет  
03680. Київ – 58, проспект Любомира Гузара, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасні телекомунікаційні системи характеризуються великою кількістю радіоелектронних засобів різного призначення. Розміщення значної кількості таких засобів в невеликому об'ємі простору, наприклад на борту літального апарату, призводить до небажаного впливу апаратури радіоелектронних засобів один на одного, що призводить до погіршення технічних характеристик радіоелектронного обладнання та в цілому ускладнює електромагнітну обстановку (електромагнітну сумісність) засобів телекомунікацій. Для поліпшення електромагнітної сумісності в даний час широко використовуються частотно-селективні пристрої (частотні фільтри), які є найважливішими елементами сучасних радіотехнічних систем. Вони широко використовуються в системах зв'язку, в фазових антенних решітках радіолокаційних станцій, а також в різній вимірювальній та спеціальній радіоапаратурі.

Одним із основних елементів частотних фільтрів є резонатори. Найважливішою характеристикою резонансної системи (резонатора), яка визначає втрати енергії в коливальній системі, крутизну схилів амплітудно-частотної характеристики фільтру, ширину смуги пропускання і затримання, а також рівні загасання енергії в смузі пропускання й затримання, є добротність. Величина добротності визначається конструкцією резонатора та втратами енергії в діелектрику і в металі провідників.

На даний час в якості розподілених резонаторів в основному використовуються найпростіші конструкції коаксіальних і полоскових ліній передачі з постійним хвильовим опором. При цьому конструктивні параметри резонаторів не змінюються по довжині. Дані обмеження не дозволяють реалізувати фільтри з необхідними малими втратами енергії в смузі пропускання і значним загасанням в смузі затримання.

Питання побудови фільтрів з необхідними властивостями висвітлені в роботах таких закордонних та вітчизняних вчених, як: Matthaе GL, Young L., Jones Emt, Amari S., Rosenberg U., Gerald C., Philip C. Magnusson, Stefanini R., Chatras M., Blondy, PG, Rebeiz, M., Литвиненко О. Н., Сошников В. І., Машковцев Б. М., Цібізов К. М., Ємелін Б. Ф., Собенін Я. А., Знам'янський А. Е., Шестопапов М. Є., Ільченко М. Є.

Таким чином, актуальність даної роботи обумовлена необхідністю створення розподілених частотно-виборчих фільтрів засобів телекомунікацій з підвищеними селективними властивостями. Тому, на сьогоднішній день актуальним є виконання наукового завдання щодо розробки науково-методичного апарату синтезу високодобротних резонаторів з розрідженим спектром для фільтруючих систем засобів телекомунікацій.

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

Дисертаційна робота виконана відповідно з поточними та перспективними планами наукової та науково-технічної діяльності Національного авіаційного університету та Державного університету телекомунікацій за тематикою подальшого розвитку радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій. Дослідження тісно пов'язано з розробкою науково-дослідної роботи, в якій автор приймала особисту участь, а саме: «Дослідження застосування

міліметрового та мультиміліметрового діапазону в телекомунікаційних системах» (Державний реєстраційний номер 0114U006294, ДУТ, м. Київ). Особисто автором в зазначеній НДР запропоновано математичну модель резонатора, відмінною рисою якої є мінімальне число змінних параметрів при використанні чисельних методів оптимізації. На основі цієї моделі здійснено синтез резонаторів по полюсах і лишках вхідного опору та побудована їх цільова функція. Це дозволило визначити оптимальні значення полюсів і лишків вхідного опору резонатора, які однозначно визначають хвильовий опір резонатора, що має максимальну добротність при заданому розподілі резонансних частот.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розробка методів підвищення частотно-селективних характеристик розподілених фільтрів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікацій.

Досягнення поставленої мети зумовило постановку й розв'язання комплексу наступних завдань:

- 1) здійснити аналітичний огляд методів синтезу неоднорідних резонаторів;
- 2) отримати аналітичні вирази для розрахунку добротності резонатора на неоднорідній лінії різних конструкцій;
- 3) обґрунтувати застосування спектрального методу до синтезу резонаторів неоднорідних ліній (неоднорідних резонаторів) і встановити зв'язок між спектрами і добротністю;
- 4) розробити метод синтезу високодобротних резонаторів різної конструкції з розрідженим спектром;
- 5) провести оцінку ефективності розроблених резонаторів за рівнем позасмугових випромінювань;
- 6) обґрунтувати підхід до вибору допусків на виготовлення резонаторів різної конструкції. Розробити рекомендації щодо контролю найбільш критичних параметрів конструкції.

**Об'єкт дослідження** – процеси в розподілених фільтрах радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій.

**Предмет дослідження** – синтез резонаторів на нерегулярних лініях передачі.

**Методи досліджень.** Для вирішення поставлених завдань в роботі використовувалася теорія розподілених мереж. Зокрема, при розробці методу синтезу високодобротних резонаторів використовувалася теорія багатоступеневих і плавно-нерегулярних ліній передачі.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В межах виконаних досліджень отримані такі наукові результати:

**Вперше:**

– розроблено метод синтезу резонаторів на нерегулярних лініях передачі. На відміну від відомих способів побудови резонаторів запропонований метод дозволяє одночасно синтезувати розподілені коливальні системи за заданим розподілом резонансних частот в заданій частотній області і величиною добротності основного типу коливань. Запропонований метод розроблений на основі спектрального підходу для синтезу пристроїв на неоднорідних лініях. Показано, що спектральний метод найбільш ефективний при синтезі неоднорідних резонаторів з урахуванням втрат. Встановлено, що спектральні

характеристики відрізка неоднорідної лінії однозначно визначають не тільки хвильовий опір, але і оптимальну конструкцію резонатора, який володіє максимальною добротністю.

**Удосконалено:**

– принципи побудови резонансних систем на лініях передачі. На відміну від існуючих методів побудови резонаторів, орієнтованих на однорідні лінії та в окремих випадках на неоднорідних лініях, отримані уточнюючі аналітичні вирази, які дозволяють визначати добротність при довільних залежностях хвильового опору і розподілених втрат від координати.

**Набуло подальшого розвитку:**

– метод синтезу високодобротних резонаторів з розрідженим спектром, який на відміну від існуючого дозволяє синтезувати резонатори на відрізках плавно-неоднорідних ліній передачі. При цьому задача визначення максимального значення добротності, вирішена за допомогою чисельних методів оптимізації;

– математична модель резонатора, відмінною рисою якої є мінімальне число змінних параметрів при використанні чисельних методів оптимізації. На основі цієї моделі здійснено синтез резонаторів по полюсах і лишках вхідного опору і побудована їх цільова функція. З використанням чисельних методів оптимізації (метод ковзного допуску, метод деформованого багатогранника) знайдені оптимальні значення полюсів і лишків вхідного опору резонатора, які однозначно визначають хвильовий опір резонатора, який володіє максимальною добротністю при заданому розподілі резонансних частот;

– алгоритми синтезу нерегулярних високодобротних резонаторів, які орієнтовані на типи неоднорідних ліній, що найбільш часто використовуються на практиці (коаксіальні, мікрополоскові, симетричні смужкові). Розроблені алгоритми відрізняються від відомих використанням мінімальної кількості варійованих параметрів і дозволяють визначити хвильовий опір резонатора з максимально можливою добротністю;

– методи оцінки допусків по контролю в процесі виробництва найбільш важливих параметрів конструкції і діелектричних матеріалів, які використовуються при виготовленні резонаторів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Основні результати дисертаційного дослідження можуть бути використані при розробці розподілених резонаторів для фільтрів підвищеної частотної вибіркової для різних телекомунікаційних пристроїв і систем.

Показано, що розроблені резонансні системи за своїми характеристиками можуть перевершувати відомі аналоги за такими параметрами:

– добротність резонаторів збільшена на 20–40 % в залежності від типу конструкції і заданої щільності спектру;

– вигреш у рівні загасання в смузї пропускання резонаторів смужкової конструкції склав 20–30 %; коаксіальної – до 80 %;

– область затримання збільшена в 2 і більше разів;

– рівень позасмугових випромінювань зменшений на 15–25 %;

– вибіркові характеристики пристроїв на базі розроблених резонаторів покращені не менше, ніж на 20 %;

– точність розрахунку резонаторів коаксіальної і смужкової конструкції дозволила скоротити на 20 % обсяг робіт з регулювання;

– масо-габаритні показники розроблених резонаторів зменшені в 1,2–2,0 рази, що відповідає вимогам комплексної інтеграції радіотехнічних пристроїв.

Практична цінність роботи підтверджена актами впровадження основних результатів дослідження у навчальному процесі Національного авіаційного університету та в практичній діяльності Комунального підприємства «Міжнародний аеропорт «Київ» (Жуляни)», для усунення перешкод, які формуються в супутникових радіонавігаційних системах, що забезпечують можливість функціонування апаратури системи EGNOS RIMS в Україні.

У додатку до дисертаційної роботи представлені документи, що підтверджують практичне використання результатів дисертаційної роботи.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати, які виносяться на захист, одержані автором особисто. Теоретичні і методологічні положення, методичні та практичні висновки дисертаційного дослідження, аналіз і критичне узагальнення зарубіжної та вітчизняної літератури з досліджуваного завдання є результатом самостійної роботи автора.

У наукових статтях, опублікованих у співавторстві, автору належать наступні наукові результати: [1] – запропоновано математичну модель прогнозування рівнів електромагнітних випромінювань; [2] – аналіз методів мінімізації фазової помилки під час моніторингу несучої частоти; [3] – алгоритм обробки даних, який враховує локальні екстремуми вейвлет-коефіцієнтів; [4] – запропоновані технічні рішення для усунення перешкод, які формуються в супутникових радіонавігаційних системах; [5] – аналіз сучасних супутникових систем передачі дискретних даних для супутникових систем зв'язку; [6,11] – досліджено особливості синтезу резонаторів на замкнутих і розімкнутих відрізках мікросмужкових і симетричних смужкових ліній передачі, для усунення перешкод, які формуються супутниковим радіонавігаційним системами, що забезпечать можливість функціонування апаратури системи EGNOS в Україні; [7] – розробка методу синтезу резонаторів на нерегулярних лініях передачі; [8] – розробка методу синтезу високодобротних резонаторів з розрідженим спектром; [9] – аналіз існуючих моделей побудови фільтрів, постановка задачі і обґрунтування базових фільтруючих елементів високошвидкісних систем передачі даних; [12] – запропоновано в якості моделі фантомного каналу витоку інформації використовувати пов'язану неоднорідну лінію передачі при парному збудженні; [13, 15] – здійснено оцінку деструктивного шумового впливу по каналах витоку інформації розподіленого фільтра високошвидкісних цифрових каналів зв'язку; [14] – запропоновано аналітичні вирази для розрахунку добротності резонатора на неоднорідній лінії різних конструкцій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 4 міжнародних наукових конференціях, серед яких: IV Міжнародна науково-практична конференція «Прикладні системи та технології в інформаційному суспільстві» (м. Київ, 30 вересня 2020 р.); IV Міжнародна науково-практичної конференції «Актуальні питання забезпечення кібербезпеки та захисту інформації» (с. Верхнє Студене – м. Київ, 21–24 лютого 2018 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку

озброєння та військової техніки сухопутних військ» (м. Львів, 17–18 травня 2018 р.); I Міжнародна науково-практична конференція «Прикладні науково-технічні дослідження» м. Івано-Франківськ, 5–7 квітня 2017 р.).

**Публікації.** За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 14 наукових праць. Основні наукові положення викладено в 10 наукових статтях [1–10], серед яких: 1 наукова стаття [1] опублікована у закордонному періодичному виданні країни, що входить до Євросоюзу; 2 наукових статті [2, 3] опубліковані у періодичних виданнях, що входять до бази даних Scopus; 7 наукових статей [4–10] опубліковані у спеціалізованих фахових виданнях України. За матеріалами виступів на науково-технічних конференціях опубліковано 4 тез доповідей [11–14].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, змісту, переліку умовних позначень, вступу, трьох розділів, загальних висновків, додатків, списку використаних джерел і має 125 сторінок основного тексту, 51 рисунок, 5 таблиць, 3 сторінки додатків. Список використаних джерел містить 138 найменувань і займає 19 сторінок. Загальний обсяг дисертаційної роботи – 147 сторінок..

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації та її відповідність науковим програмам, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт та предмет дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок автора, а також наведені дані щодо апробації та публікацій результатів дослідження.

**Перший розділ «Аналітичний огляд методів побудови розподілених частотно-селективних радіотехнічних пристроїв»** присвячено проведенню аналізу перспективних та існуючих в даний час систем фільтрації. В результаті чого зроблено висновок про те, що найбільш перспективними на сучасному етапі розвитку функціональної електроніки та промислового виробництва радіотехнічних матеріалів, є пристрої селекції на відрізках неоднорідних смужкових і коаксіальних ліній передачі, що забезпечують задану щільність спектру резонансних частот і мають максимально високу добротність. Однак, при реалізації таких пристроїв розробники стикаються із серйозними труднощами, обумовленими відсутністю аналітичних виразів для розрахунку добротності резонансних систем, відсутністю методів синтезу високодобротних резонаторів, а також з відсутністю алгоритмів розрахунку їх конструктивних параметрів. Крім того, для більшості розроблених пристроїв не обґрунтовано вибір допусків при виготовленні, що викликає необхідність регулювання та веде до великого відсотку браку, збільшення собівартості продукції під час виробництва.

В результаті аналізу існуючих методів синтезу фільтруючих систем з широкою смугою затримання і високими селективними властивостями обрано основний метод дослідження, що полягає в підході до синтезу високодобротних резонансних систем з позицій спектральної теорії неоднорідних ліній в поєднанні з методами чисельного синтезу.



**Другий розділ «Синтез високодобротних резонаторів на нерегулярних лініях передачі»** присвячений питанню синтезу високодобротних резонаторів на нерегулярних лініях передачі.

Відомо, що процеси в нерегулярній лінії з втратами описуються системою телеграфних рівнянь

$$-\frac{d\bar{u}(x)}{dx} = (pL(x) + R(x))\bar{i}(x), \quad -\frac{d\bar{i}(x)}{dx} = (pC(x) + G(x))\bar{u}(x), \quad (1)$$

де  $\bar{u}(x)$ ,  $\bar{i}(x)$  – зображення по Лапласу напруги і струму в лінії передачі;  $L(x)$ ,  $C(x)$ ,  $R(x)$ ,  $G(x)$  – погонна індуктивність, погонна ємність, погонний активний опір, погонна активна провідність витоку;  $x$  – поточна довжина (координата);  $p$  – параметр Лапласа, комплексна частотна змінна.

На основі аналізу рівнянь (1), за припущень малих втрат, отримано вираз для добротності резонатора, як відношення уявної частини резонансної частоти до дійсної:

$$Q = \frac{\omega' t_3}{2 \left( \int_0^l \alpha_{\text{пр}}(x) dx + \int_0^l \alpha_{\text{д}}(x) dx \right)}. \quad \alpha_{\text{пр}}(x) = \frac{R(x)}{2W(x)}, \quad \alpha_{\text{д}}(x) = \frac{G(x)W(x)}{2}, \quad (2)$$

де  $W(x)$  – хвильовий опір;  $\omega'$  – дійсна резонансна частота.

Перевагою формули (2) є її універсальність по відношенню до типу конструкції резонатора. Обчислення добротності резонатора передбачає знання хвильового опору і закону розподілу втрат в лінії.

Обґрунтовано спектральний підхід до синтезу резонаторів на відрізках неоднорідних передавальних ліній з втратами. Показано, що спектральні характеристики однозначно визначають не тільки хвильовий опір лінії, але і добротність резонатора. При реалізації спектрального підходу в якості вхідного опору резонатора без втрат використовувався деформований опір лінії з постійним хвильовим опором і часом затримки. У цьому випадку опір резонатора на нерегулярній лінії можна представити у вигляді

$$Z_{\text{вхнл}}(p) = Z_{\text{вхол}}(p) - \sum_{i=1}^n \frac{W(0)2pt_3}{p^2 t_3^2 + \omega_i^2 t_3^2} + \sum_{i=1}^n \frac{W(0)\alpha_i pt_3}{p^2 t_3^2 + \beta_i^2 t_3^2}, \quad (3)$$

де  $Z_{\text{вхол}}(p)$  – опір однорідної (регулярної) розімкнутої або замкнутої лінії.

Для розімкнутого відрізка регулярної лінії з хвильовим опором вхідний опір буде дорівнювати:

$$Z_{\text{вхол}}(p) = W(0)cthpt_3.$$

У даному випадку  $\pm j \frac{\omega_i}{t_3} = \pm j \frac{i\pi}{t_3}, i = 1, 2, \dots, n$  – пари комплексно сполучених полюсів функції  $cthpt_3$  відрізка регулярної лінії передачі з часом затримки  $t_3$ ;  $\pm j \frac{\beta_i}{t_3}, \pm j \frac{\alpha_i W(0)}{t_3}, i = 1, 2, \dots, n$  – пари комплексно сполучених полюсів опору відрізка нерегулярної лінії передачі з часом затримки, що визначаються виходячи з необхідного розносу резонансних частот і отримання максимальної добротності резонатора на робочій частоті.

Аналогічні вирази можна записати і для деформованого опору замкнутої нерегулярної лінії. В роботі отримано вираз для хвильового опору резонатора з вхідним опором (3), який залежить від незалежних параметрів:

$$\frac{\beta_i}{t_3}, \frac{\alpha_i W(0)}{t_3}, i = 1, 2, \dots, n.$$

Таким чином, задавшись цими параметрами, отримаємо резонатор з необхідним спектром, тобто з необхідним розподілом резонансних частот. При цьому для заданого типу конструкції резонатора будуть відомі залежності розподілу втрат: погонні параметри резонатора;  $R(x), G(x)$ . Для визначення конструктивних параметрів резонатора з максимально можливою добротністю вводяться додаткові варіативні параметри  $\beta_i, \alpha_i$ , шляхом збільшення числа варіативних параметрів  $n$ .

На підставі вищенаведеного розроблено метод і узагальнений алгоритм синтезу високодобротних резонаторів на відрізках неоднорідних ліній передачі, в якій задача визначення максимальної добротності резонатора вирішується за допомогою чисельних методів оптимізації.

При цьому вихідними даними для синтезу є:

- положення першого полюса, що визначає резонансну частоту резонатора;
- кількість полюсів, якими визначається спектр нерегулярній лінії;
- значення щільності спектру, що забезпечується резонатором;
- кількість точок розбиття хвильового опору  $W(\tau)$ , які застосовуються при оптимізації;
- кількість точок розбиття для остаточного аналізу;
- дані для розрахунку конструкції резонатора на конкретному типі лінії передачі (відносна діелектрична проникність  $\epsilon_r$ , тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$ , товщина підкладки  $h$ , товщина  $b$ , питомий опір матеріалу провідної смужки  $\rho$ );
- час затримки резонатора  $t_3$ ;

– граничні значення хвильового опору на початку лінії  $W(0)$  і поточного значення хвильового опору  $W_{\text{ДОП}}^{\text{Н}}$ ,  $W_{\text{ДОП}}^{\text{В}}$ , що визначають область значень  $W(\tau)$ , реалізованих у вигляді полоскових ліній, а також значення величин  $\alpha_i^{\text{В}}$ ,  $\beta_i^{\text{Н}}$ ,  $\beta_i^{\text{В}}$ , задають початкову допустиму область  $D$ ;

– межі зміни часу затримки  $t_3^{\text{Н}}$ ,  $t_3^{\text{В}}$ , що відповідають допустимим геометричним розмірам нерегулярної лінії.

Обґрунтовано математичну модель резонатора з мінімальним числом варійованих параметрів  $\bar{A}$ . На основі математичної постановки задачі синтезу по полюсах і лишках  $\alpha_i$  вхідного опору побудована цільова функція і досліджені її особливості. Основною відмінністю є те, що цільова функція задана алгоритмічно. Вона є багатоекстремальною з неявно вираженими локальними екстремумами на допустимій області. Допустима область  $D$  під час синтезу визначена обмеженнями з урахуванням фізичної можливості щодо виготовлення резонаторів.

Показано, що в даному випадку для вирішення завдання оптимізації значень полюсів і лишків, найбільш прийнятним є метод ковзного допуску з використанням методу деформованого багатогранника.

За знайденими оптимальними значеннями полюсів і лишків  $\alpha_i$  визначено хвильовий опір резонатора, що володіє максимальною добротністю і заданим розподілом резонансних частот.

Показано, що метод можна застосовувати для синтезу резонаторів різних конструкцій. Для цього необхідно в алгоритмі обчислення цільової функції змінити формули для розрахунку хвильового опору за конструктивними параметрами.

Таким чином, розроблено методику синтезу коаксіальних короткозамкнутих високочастотних резонаторів з розрідженим спектром. Розглянуто різні варіанти зміни конструктивних параметрів для досягнення максимальної добротності при заданій розрядці резонансних частот.

**Третій розділ «Оцінка технічних характеристик резонаторів і рекомендації щодо їх розробки та реалізації»** присвячений синтезу резонаторів на нерегулярних лініях передачі, що мають заданий розподіл резонансних частот в робочій області і максимальну добротність на робочій резонансній частоті.

На основі розробленого спектрального підходу було виконано синтез резонатора на відрізку нерегулярної мікрополоскової лінії передачі (рис. 1), за умови таких вихідних даних:

- підкладка виконана з полікору ( $\epsilon_r = 9,6$ ) товщиною 1 мм;
- провідна смужка виконана з міді ( $\rho = 0,172 \cdot 10^{-7}$ ) товщиною 0,03 мм;
- допустимий діапазон зміни хвильового опору 20–130 Ом.

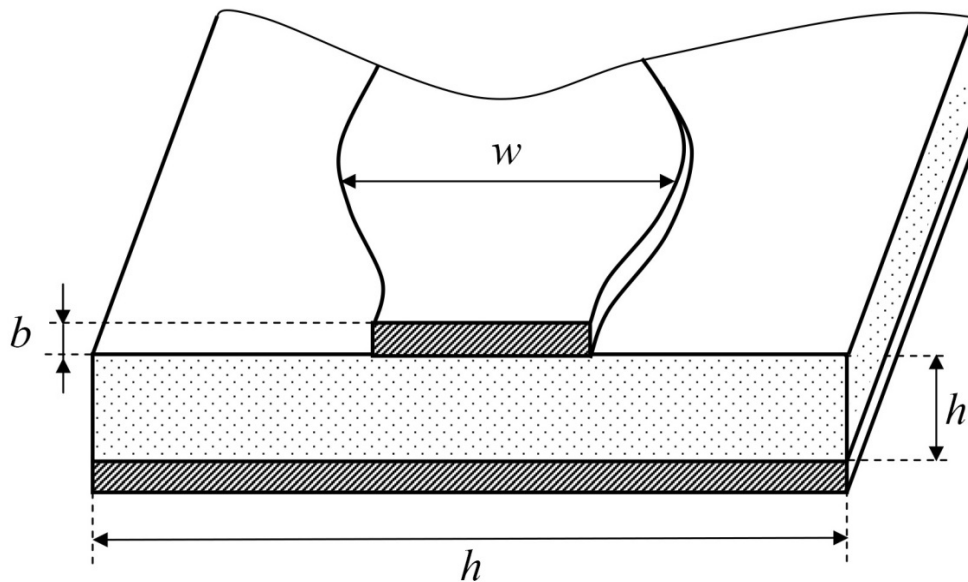


Рис. 1. Резонатор на плавно-нерегулярній мікросмужковій лінії

У таблиці 1 наведені початкові і оптимальні значення параметрів синтезованих резонаторів.

Таблиця 1

**Результати оптимізації параметрів мікросмужкових резонаторів**

Тип резонатора	Значення варійованих параметрів $\frac{\text{Початкове}}{\text{Оптимальне}}$					
	$W(0), \text{Ом}$	$t_3 \cdot 10^{-9}, \text{с}$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta_1$	$\beta_2$
Мікрополосковий паралельного типу, рис. 3.1, 3.2 $f_1 / f_0 = 3$	$\frac{50}{20,6}$	$\frac{5,5}{4,99}$	$\frac{2,5}{2,06}$	$\frac{2,5}{2}$	$\frac{\pi}{3,54}$	$\frac{2\pi}{5,96}$
Мікрополосковий прохідного типу, рис. 3 $f_1 / f_0 = 2$	$\frac{50}{20,3}$	$\frac{2,5}{2,41}$	$\frac{2,5}{1,96}$	$\frac{2,5}{1,89}$	$\frac{\pi/2}{\pi/2}$	$\frac{3\pi/2}{4,6}$
Мікрополосковий паралельного типу, рис. 3 $3 f_1 / f_0 = 3$	$\frac{50}{38}$	$\frac{4,5}{5}$	$\frac{2,5}{1,99}$	$\frac{2,5}{2,08}$	$\frac{\pi}{\pi}$	$\frac{2\pi}{2\pi}$
Мікрополосковий прохідного типу, рис. 3 $f_1 / f_0 = 2$	$\frac{50}{44,4}$	$\frac{2,5}{2,4}$	$\frac{2,5}{1,73}$	$\frac{2}{1,82}$	$\frac{\pi/2}{\pi/2}$	$\frac{3\pi/2}{3\pi/2}$

Таким чином, в роботі запропоновано метод синтезу високодобротних резонаторів з розрідженим спектром, який на відміну від існуючого дозволяє синтезувати резонатори на відрізках плавно-неоднорідних ліній передачі. При цьому задача визначення максимального значення добротності, вирішена за допомогою чисельних методів оптимізації

За результатами порівняльного аналізу значень добротності однорідного  $Q_0$  (крива 1, рис. 2) і неоднорідного  $Q_{\max}$  (крива 2, рис. 2) резонаторів видно, що добротність неоднорідних резонаторів в інтервалі частот від 1 ГГц до 6 ГГц вище добротності однорідних резонаторів на (30–40) % при щільності спектра резонансних частот, що дорівнює 3.

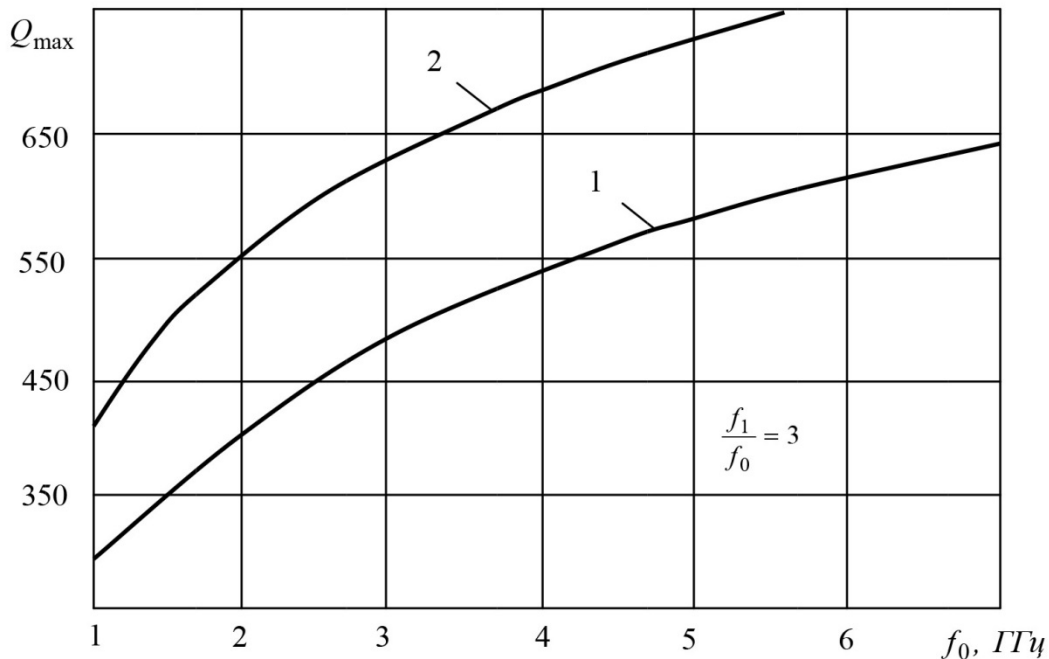


Рис. 2. Залежність добротності замкнених резонаторів від резонансної частоти при ширині резонансних частот, що дорівнює 3:

1 – резонатор на регулярній лінії; 2 – резонатор на нерегулярній лінії

Аналіз залежності максимальних значень добротності резонаторів від значень розрядки наведено на рис. 3. Крива 1 відповідає значенням добротності резонаторів з початковими значеннями параметрів  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ; крива 2 – добротності резонаторів з максимально можливою добротністю  $Q_{\max}$ . З графіків видно, що в результаті оптимізації, знайдені значення лишків в полюсах, що забезпечують задану ширину області затримання, визначають закон, зміни ширини провідної смужки уздовж резонатора, при якому втрати енергії мінімальні.

В діапазоні розрядок до 6 разів вииграш по добротності становить від 40 % до 110 %. Для дослідження значень розрядки більше 6 необхідно змінювати значення третього полюса і лишках у всіх трьох полюсах.

Із зростанням розрядки максимальне значення добротності знижується. Це обумовлено зростанням втрат у провідній смужці, викликаних більш різкою зміною хвильового опору уздовж резонатора. Закон зміни хвильового опору уздовж довжини резонатора при резонансній частоті  $f_0 = 1$  ГГц і розрядкою

$f_1 / f_0 = 3$  показана на рис. 4. та рис. 5. Разом із цим був отриманий закон зміни хвильового опору при резонансних частотах  $L1$  та  $L2$ .

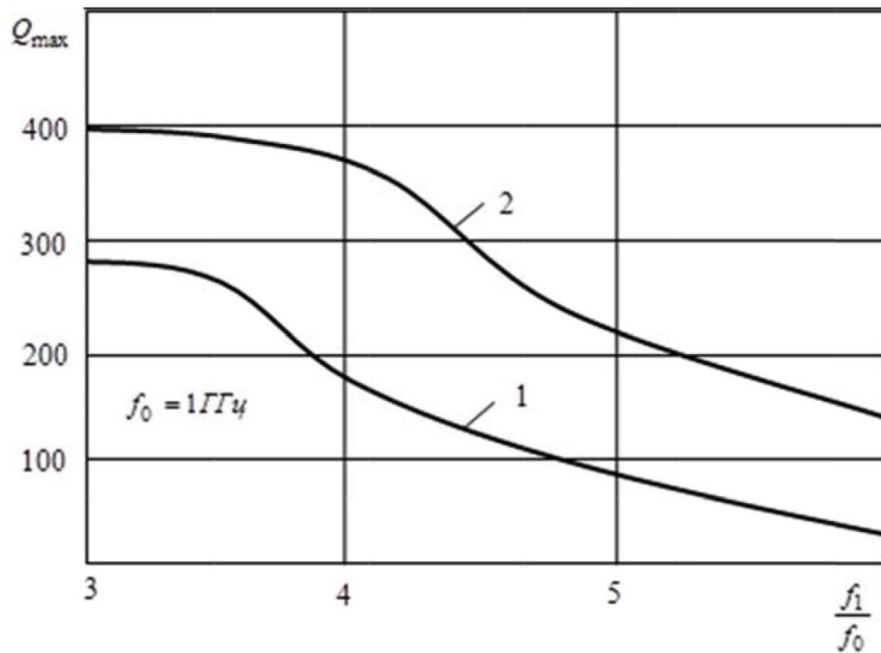


Рис. 3. Залежність максимальної добротності резонаторів від ширини резонансних частот: 1 – добротність резонатора з початковими значеннями параметрів  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ; 2 – добротність резонатора с максимально можливою добротністю  $Q_{\max}$

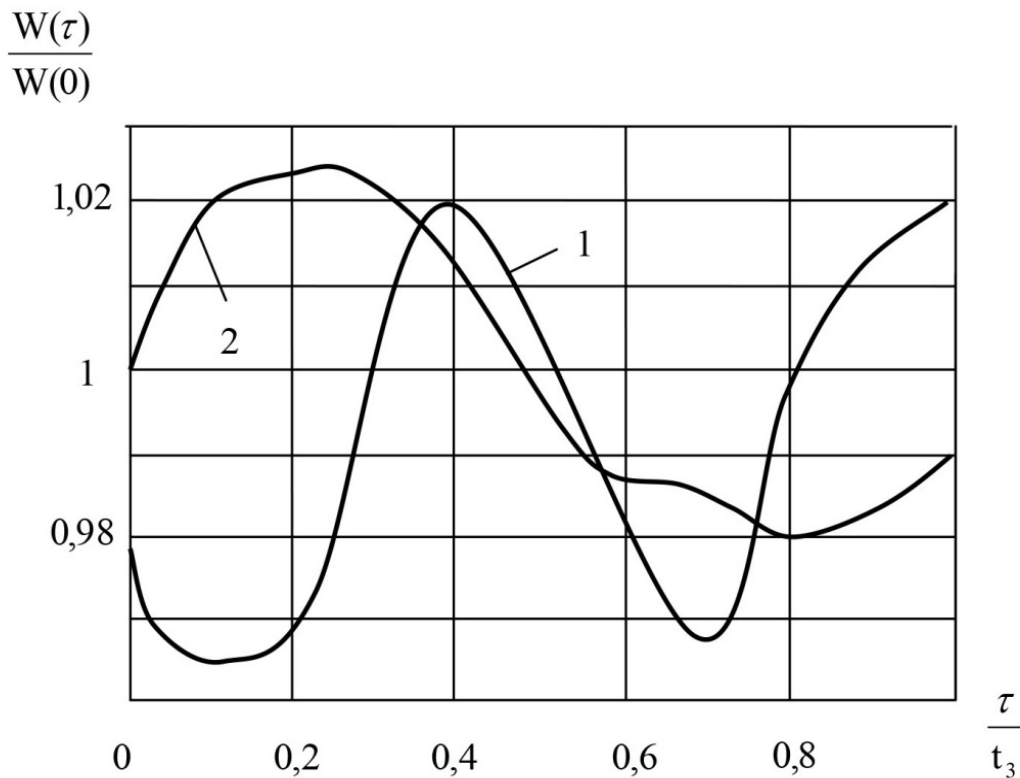


Рис. 4. Залежність хвильового опору від часу затримки: 1 –  $f_0 = 1 ГГц$ ,  $f_1 / f_0 = 3$ ; 2 – закон зміни хвильового опору прохідного резонатора, розрахованого за даними табл. 1,  $f_1 / f_0 = 2$

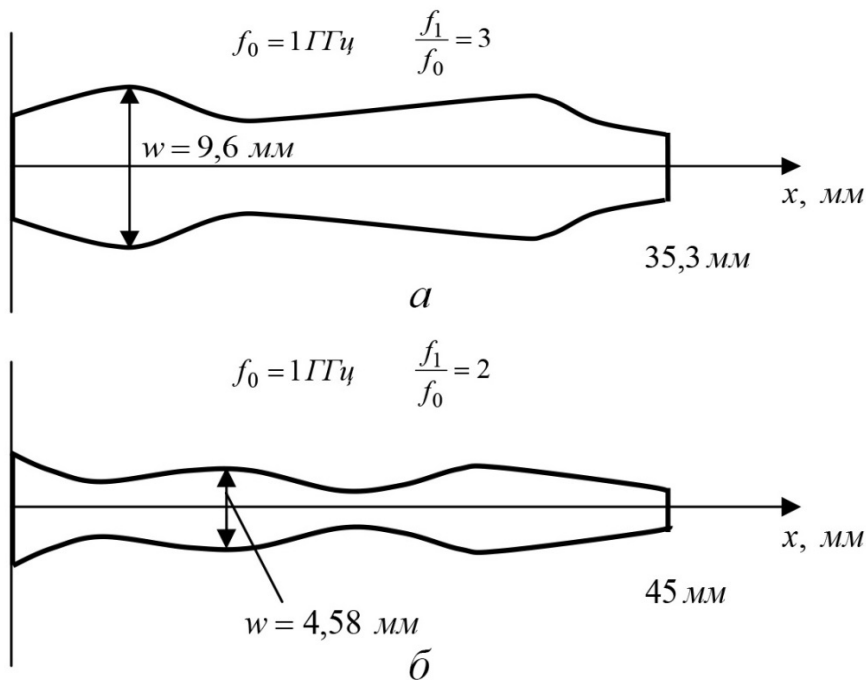


Рис. 5. Профілі струмопровідних смужок мікросмужкових резонаторів:  
*a* – резонатор паралельного типу; *б* – резонатор прохідного типу

Розроблено принципи побудови високодобротних двоступеневих коаксіальних резонаторів. Для розширення смуги затримання фільтруючої системи з резонаторами паралельного типу відношення  $f_1 / f_0$  має бути більше 3. Це можливо тільки при використанні неоднорідної лінії в якості резонатора.

Показано, що зміною перепаду хвильових опорів по довжині можна домогтись необхідної розрядки спектра  $f_1 / f_0$ . Зміна хвильового опору досягається за рахунок зміни діелектричної проникності першого ступеня резонатора, що призводить до зміни її геометричної довжини.

Електрична довжина першого відрізка залишається при цьому незмінною за рахунок зміни фазової швидкості хвилі. Розроблено алгоритм оптимізації, який забезпечує розрахунок максимально можливого значення діаметра зовнішнього провідника коаксіальної лінії, при якому не порушуються вищі типи коливань при заданому значенні відносної діелектричної проникності  $\epsilon_{r2}$ , що забезпечує максимальну добротність коливальної системи і задану ширину спектру. Необхідно відзначити, що відношення діаметрів провідників коаксіального резонатора, що дорівнює 3.6, є оптимальним і гарантує отримання максимуму добротності.

Однак, за рахунок зміни діелектричної проникності діелектрика в ступенях резонатора (при встановлених межах зміни  $\epsilon_{r1}$ ,  $\epsilon_{r2}$ ) можна отримати обмежене значення ширини області затримання, обумовлене межею відношення хвильових опорів. Для отримання більш високих значень розрядки необхідно домогтись збільшення стрибка хвильового опору шляхом зміни діаметрів провідників в другому ступені, а також відношення цих діаметрів до меж, при яких в резонаторі зберігається одномодовий режим.

Здійснено аналіз впливу відхилень конструктивних параметрів резонатора (діелектричної проникності, довжини, геометрії провідників) на відхилення добротності резонатора від максимально можливого значення (рис. 6).

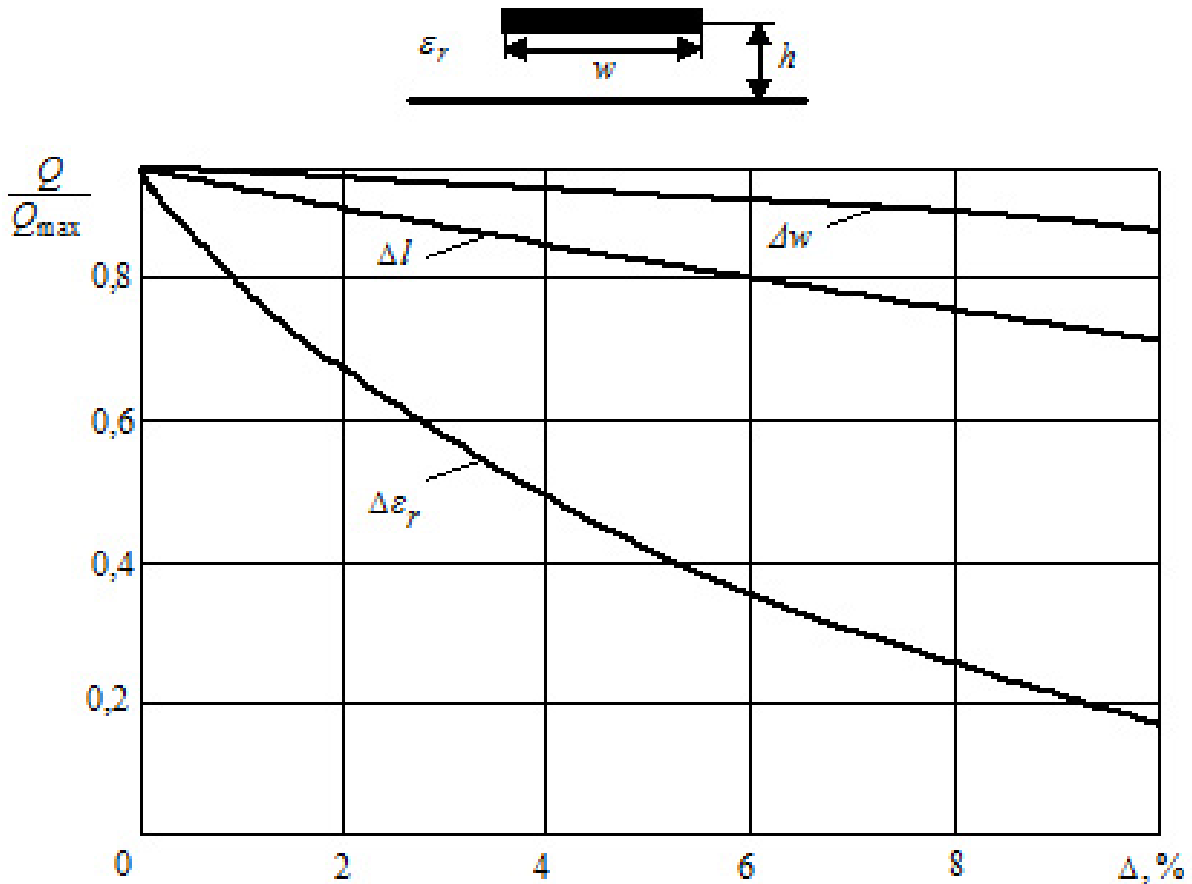


Рис. 6. Залежності зменшення максимальної добротності від відхилення конструктивних параметрів мікрополоскового резонатора від оптимальних:  
 $\Delta \epsilon_r$  – відхилення відносної діелектричної проникності від оптимального значення;  
 $\Delta w$  – відхилення ширини струмонесучої смужки від оптимального значення;  
 $\Delta L$  – відхилення довжини резонатора від оптимального значення

Як видно з наведених залежностей, найбільший вплив на величину добротності робить зміна діелектричної проникності підкладки. Це обумовлено тим, що від величини діелектричної проникності залежить швидкість поширення електромагнітної хвилі, а значить і час затримки і в кінцевому підсумку величина хвильового опору і втрат.

Таким чином, в роботі набули подальшого розвитку методи оцінки допусків по контролю в процесі виробництва найбільш важливих параметрів конструкції і діелектричних матеріалів, які використовуються при виготовленні резонаторів.

## ВИСНОВКИ

В результаті дисертаційних дослідження вирішено актуальне наукове завдання щодо розробки науково-методичного апарату синтезу високодобротних резонаторів з розрідженим спектром для фільтруючих систем



засобів телекомунікацій. Вирішення поставленого наукового завдання забезпечує розрахунок і можливість побудови фільтруючої системи зі знизеним затуханням в смузі пропускання і розширеною областю затримання, що дозволяє підвищити ефективність роботи телекомунікаційних пристроїв. Дане наукове завдання має суттєве значення для розроблення пристроїв формування, генерування, підсилення, фільтрації, модуляції та демодуляції, кодування, декодування в системах радіотехніки та телекомунікацій. Відсутність аналогічних рішень у нашій країні та за кордоном робить результати досліджень пріоритетними.

Основні результати дисертаційної роботи полягають в такому:

1. Існуючі методи синтезу неоднорідних резонаторів не дозволяють в повній мірі використовувати потенційні можливості неоднорідних ліній передачі. Це обумовлено тим, що відсутні методи розрахунку неоднорідних резонаторів з оптимальними розподіленими параметрами, що забезпечують максимальну добротність при заданій розрядці спектра резонансних частот. У застосовуваних методах не використовується зв'язок добротності резонатора з оптимальною конструкцією за допомогою спектральних характеристик, що не дозволяє повністю використати всі властивості неоднорідних ліній передачі. Дана обставина обмежує застосування неоднорідних резонаторів в частотно-селективних системах.

2. Отримано аналітичні вирази для розрахунку добротності резонатора на відрізку нерегулярної лінії передачі з урахуванням малих втрат в провіднику і діелектрику. Його перевагою є універсальність по відношенню до типу конструкції резонатора і його хвильового опору.

3. Особливість запропонованого методу синтезу резонаторів на нерегулярних лініях передачі полягає в тому, що він розроблений на основі спектрального підходу до синтезу пристроїв на неоднорідних лініях. Показано, що спектральний метод найбільш ефективний при синтезі неоднорідних резонаторів з урахуванням втрат. Встановлено, що спектральні характеристики відрізка неоднорідної лінії однозначно визначають не тільки хвильовий опір, але і оптимальну конструкцію резонатора, що володіє максимальною добротністю.

4. Розроблено метод синтезу високодобротних резонаторів з розрідженим спектром на відрізках неоднорідних передавальних ліній, в якому завдання визначення оптимальної (з точки зору максимального значення добротності) конструкції, вирішено за допомогою чисельних методів оптимізації.

5. Розроблено математичну модель резонатора з мінімальним числом варійованих параметрів. На основі цієї моделі здійснено синтез резонаторів по полюсах і лишках вхідного опору резонатора і побудована його цільова функція. З використанням чисельних методів оптимізації (метод ковзного допуску, метод деформованого багатогранника) знайдені оптимальні значення полюсів і лишків вхідного опору резонатора, які однозначно визначають

хвильовий опір резонатора, що володіє максимальною добротністю при заданому розподілі резонансних частот.

6. Розроблено методи та алгоритми синтезу нерегулярних високодобротних резонаторів, які орієнтовані на типи неоднорідних ліній, що найбільш часто використовуються на практиці (коаксіальна, мікросмужкова, симетрична смужкова лінія передачі). На відміну від відомих способів побудови резонаторів запропонований метод дозволяє одночасно синтезувати розподілені коливальні системи за заданим розподілом резонансних частот в заданій частотній області і величиною добротності основного типу коливань.

7. Проведено оцінку ефективності розроблених резонаторів та показано, що розроблені за запропонованою методикою резонансні системи за своїми характеристиками перевершують відомі аналоги за такими параметрами:

- добротність резонаторів збільшена на 20–40 % в залежності від типу конструкції і заданої розрядки спектра;
- вигреш в рівні загасання в смузі пропускання резонаторів смужкової конструкції склав 20–30 %; коаксіальної – до 80 %;
- область затримання збільшена в 2 і більше разів;
- рівень позасмугових випромінювань зменшений на 15–25 %;
- вибіркові характеристики пристроїв на базі розроблених резонаторів покращені не менше, ніж на 20 %;
- точність розрахунку резонаторів коаксіальної і полоскової конструкції дозволила скоротити на 20 % обсяг робіт з регулювання;
- масо-габаритні показники розроблених резонаторів зменшені в 1,2–2,0 рази, що відповідає вимогам програми комплексної мініатюризації радіотехнічних пристроїв.

8. Обґрунтовано допуски на точність дотримання цих параметрів. Розроблено рекомендації щодо контролю в процесі виробництва найбільш важливих (з точки зору електричних характеристик) параметрів конструкції і діелектричних матеріалів, використовуваних при виготовленні резонаторів.

9. Достовірність отриманих результатів підтверджується:

- використанням у математичній моделі загальноприйнятих апробованих припущень;
- задовільним співпадінням розрахункових характеристик з характеристиками, отриманими в результаті експериментальних досліджень.

10. Результати досліджень прийняті до впровадження в Комунальному підприємстві «Міжнародний аеропорт «Київ» (Жуляни)», для усунення перешкод, які формуються в супутникових радіонавігаційних системах, що забезпечують можливість функціонування апаратури системи EGNOS RIMS в Україні; та в навчальному процесі кафедри засобів захисту інформації Національного авіаційного університету, що підтверджено актами впровадження.

11. Перспективними шляхами подальших досліджень у зазначеному напрямку може бути широке коло питань щодо розробки нових та удосконалення існуючих методик підвищення добротності резонаторів з оптимальною конструкцією за допомогою спектральних характеристик, що орієнтовані на різні типи неоднорідних передавальних ліній в частотно-селективних системах.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ліщиновська Н. О., Бахтіяров Д. І., Комарницький О. О., Лавриненко О. Ю. Методи оцінювання та прогнозування рівнів електромагнітних випромінювань в урбанізованих середовищах. [Електронний ресурс]. European Scientific e-Journal, 2020. Режим доступу до ресурсу: DOI:10.47451/inn2020-12-001.

2. Lishchynovska, N., Kozlovskiy, V., Turovsky, O., Balanyuk, Y., Boiko, Y., Consideration of limitations, which are formed by the input signal, on the phase error minimization process during carrier frequency tracking system of synchronization of radio technical device of communication. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 2020, 9(5), с. 8922–8928. (Scopus)

3. Lishchynovska N., Lachno V., Kasatkin D., Kozlovskiy V., Kravchuk P. A model and algorithm for detecting spyware in medical information system Scopus. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, Issue 1, January 2019. – P. 287–295. (Scopus)

4. Ліщиновська Н. О. Можливість забезпечення завадостійкості обладнання системи EGNOS RIMS на основі резонаторів на нерегулярних лініях передач. Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава: ПНТУ, 2020. Вип. 3(61). – С. 146–149.

5. Ліщиновська Н. О., Туровський О. Л., Панадій С. В. Особливості та завдання щодо оцінювання несучої частоти сучасних супутникових систем передачі даних. Телекомунікаційні та інформаційні технології: науковий журнал. Київ: ДУТ, 2020. № 1 (66). – С. 174–187.

6. Ліщиновська Н. О., Ільїн О. Ю., Бойко Ю. П. Аналіз автоматизованих систем управління повітряним рухом на прикладі системи EGNOS. Телекомунікаційні та інформаційні технології: науковий журнал. Київ: ДУТ, 2020. № 2 (67). – С. 40–49.

7. Ліщиновська Н. О., Барабаш О. В., Бойко Ю. П. Метод визначення добротності резонатора не регулярної лінії передач. Науково-практичний журнал «Зв'язок». Київ: ДУТ, 2018. № 6 (136). – С. 7–11.

8. Ліщиновська Н. О., Барабаш О. В., Бойко Ю. П. Синтез конструкцій резонатора за критерієм забезпечення максимальної добротності. Телекомунікаційні та інформаційні технології: науковий журнал. Київ: ДУТ, 2018. № 4 (61). – С. 5–13.

9. Ліщиновська Н. О., Приходько Т. Ю., Бойко Ю. П. Побудова СВЧ фільтруючих пристроїв. Вісник Інженерної академії України. Київ: НАУ, 2017. № 3. – С. 142–148.

10. Ліщиновська Н. О., Приходько Т. Ю., Басюк І. О. «Спектральний підхід до синтезу пристроїв на основі неоднорідних ліній та визначення хвильового опору по центральним частотам каналів витоку інформації (огляд)» Наукоємні технології. No1(49). 2019. – С. 30–35.

11. Ліщиновська Н. О., Баланюк Ю. В., Бойко Ю. П. Особливості синтезу резонаторів на нерегулярних лініях передачі для апаратури системи EGNOS. «Прикладні системи та технології в інформаційному суспільстві»: зб. тез доповідей і наук. повідомл. учасників IV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 30 вересня 2020 р.) Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2020. – С. 9–13.

12. Ліщиновська Н. О., Козловський В. В., Приходько Т. Ю. Модель фантомного каналу утечки інформації по цепі питания. «Актуальні питання забезпечення кібербезпеки та захисту інформації»: матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції, (с. Верхнє Студене – м. Київ, 21–24 лютого 2018 р.). Київ: Європейський університет, 2018. – С. 71–74.

13. Ліщиновська Н. О., Рижов С. І., Приходько Т. Ю. Проблеми проектування перешкодопридушуючих фільтрів швидкісних цифрових телекомунікаційних систем військової техніки зв'язку. Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ» (м. Львів, 17–18 травня 2018 р.). Львів, 2018. – С. 238–239.

14. Ліщиновська Н. О., Приходько Т. Ю., Методи збільшення добротності резонатора нерегулярної лінії передачі. I Міжнародна науково-практична конференція «Прикладні науково-технічні дослідження». (м. Івано-Франківськ, 5–7 квітня 2017 р.). Івано-Франківськ: Академія ієхнічних наук України, 2017. – С. 154–156.

## АНОТАЦІЯ

**Ліщиновська Н. О. Метод синтезу розподілених високодобротних резонаторів з розрідженим діапазоном частот для радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – «Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій». – Національний авіаційний університет. Київ, 2021.

В роботі сформульовано та вирішено актуальне наукове завдання щодо розробки науково-методичного апарату синтезу високодобротних резонаторів з розрідженим спектром для фільтруючих систем засобів телекомунікацій. Вирішення поставленого наукового завдання забезпечує розрахунок і можливість побудови фільтруючої системи зі знизеним затуханням в смузі пропускання і розширеною областю затримання, що дозволяє підвищити ефективність роботи телекомунікаційних пристроїв.

На основі спектрального підходу розроблено метод синтезу резонаторів на нерегулярних лініях передачі. На відміну від відомих способів побудови резонаторів запропонований метод дозволяє одночасно синтезувати розподілені

коливальні системи за заданим розподілом резонансних частот в заданій частотній області і величиною добротності основного типу коливань. Показано, що спектральний метод найбільш ефективний при синтезі неоднорідних резонаторів з врахуванням втрат. Розроблено топології полоскових і коаксіальних резонаторів, що мають максимальну добротність.

**Ключові слова:** пристрій, радіоелектронне обладнання, лінія передачі, резонатор, добротність, резонансна частота, фільтр, пристрій частотної селекції, хвильовий опір, амплітудно-частотна характеристика.

### АННОТАЦІЯ

**Лициновская Н. А. Метод синтеза распределённых высокодобротных резонаторов с разряженным диапазоном частот для радиотехнических устройств и средств телекоммуникаций. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.13 – «Радиотехнические устройства и средства телекоммуникаций. – Национальный авиационный университет. Киев, 2021.

В результате проведенного анализа методов построения резонаторов установлено, что наиболее перспективными на данном этапе развития распределённых устройств средств телекоммуникаций и промышленного производства радиотехнических материалов, являются устройства селекции на отрезках неоднородных полосковых и коаксиальных линий передачи, обеспечивающих заданную разрядку спектра резонансных частот и имеющих максимально высокую добротность. Однако при реализации таких устройств разработчики сталкиваются с серьёзными трудностями, обусловленными отсутствием аналитических выражений для расчёта добротности резонансных систем, отсутствием методов синтеза высокодобротных резонаторов, а также с отсутствием алгоритмов расчёта их конструктивных параметров. Кроме того, для большинства разработанных устройств не обоснован выбор допусков при изготовлении, что вызывает необходимость регулировок и ведёт к большему проценту брака и повышению себестоимости при производстве.

Разработан метод синтеза высокодобротных резонансных систем с позиций спектральной теории неоднородных линий в сочетании с методами численного синтеза. Идея предложенного метода синтеза резонаторов состоит в следующем. Из теории длинных линий известно, что входное сопротивление линии однозначно определяет закон изменения волнового сопротивления. Следовательно, для построения резонатора, обладающего требуемыми электрическими характеристиками надо сформировать его входное сопротивление, в котором были бы заложены все необходимые свойства резонансной системы. В работе в качестве системы универсальных параметров предложено использовать резонансные частоты (спектр линии) и вычеты сопротивления резонатора на резонансных частотах. Тогда, изменяя положение резонансных частот в рабочей области можно добиться заданного положения основной (рабочей) резонансной частоты и требуемого распределения нерабочих (паразитных) резонансов, которые обуславливают паразитные

полосы пропускания частотных фильтров. Что касается выбора вычетов на резонансных частотах, то их можно выбрать исходя из дополнительных условий. В качестве данного условия в работе предложено использовать добротность резонатора на основной частоте. Таким образом, изменением спектра в нерабочей области и вычетов на всех частотах спектра можно получить заданное значение добротности основного резонанса.

В работе рассмотрены неоднородные линии с потерями. В отличие от существующих методов построения резонаторов, ориентированных в основном на однородные линии, получены уточняющие аналитические выражения, позволяющие определять добротность при произвольных зависимостях волнового сопротивления и распределённых потерь от координаты.

Разработана математическая модель резонатора, отличительной особенностью которой является минимальное число варьируемых параметров при использовании численных методов оптимизации. На основе этой модели осуществлён синтез резонаторов по полюсам и вычетам входного сопротивления и построена его целевая функция. С использованием численных методов оптимизации (метод скользящего допуска, метод деформированного многогранника) найдены оптимальные значения полюсов и вычетов входного сопротивления резонатора, которые однозначно определяют волновое сопротивление резонатора, обладающего максимальной добротностью при заданном распределении резонансных частот.

Разработаны алгоритмы синтеза нерегулярных высокодобротных резонаторов, которые ориентированы на типы неоднородных линий, наиболее часто используемых на практике (коаксиальная, микрополосковая, симметричная полосковая). Предложенные алгоритмы отличаются от известных использованием минимального количества варьируемых параметров и позволяют определить волновое сопротивление резонатора с максимально возможной добротностью.

Осуществлена оценка допусков по контролю в процессе производства наиболее важных параметров конструкции и диэлектрических материалов, используемых при изготовлении резонаторов. Разработаны топологии полосковых и коаксиальных резонаторов, имеющих максимальную добротность.

**Ключевые слова:** устройство, радиоэлектронное оборудование, линия передачи, резонатор, добротность, резонансная частота, фильтр, устройство частотной селекции, волновое сопротивление, амплитудно-частотная характеристика.

## ABSTRACT

**Lishchinovska N. O. Method of synthesis of distributed high-frequency resonators with discharged frequency spectrum for radio engineering devices and telecommunication devices. – Manuscript.**

Dissertation for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.12.13 – “Radiotechnical Devices and Telecommunications Devices”. National Aviation University. Kyiv, 2021.

In the robot, the scientific development of the development of a scientific-methodical apparatus for the synthesis of high-quality resonators with a developed spectrum for filter systems for telecommunication systems has been formulated. The renewal of the supplied science department will ensure the development of the system and the ability to induce the filtering system to reduce the attenuation in smoothies and the broadened area of operation, as well as allowing the development of telecommuting efficiency.

On the basis of the spectral approach, the method for the synthesis of resonators on irregular transmission lines has been broken up. On the basis of different ways of stimulating the resonators in the proponation, the method allows one hour to synthesize the generation of colival systems for a given rise of resonance frequencies in a given frequency region and the value of the quality factor of the main type of colivan. It is shown that the spectral method is the most effective in the synthesis of non-uniform resonators with interruptions. The topology of strip and coaxial resonators has been broken down to provide the maximum quality factor.

**Key words:** device, radioelectronic equipment, transmission line, resonator, quality factor, resonant frequency, filter, frequency selection device, wave impedance, amplitude-frequency response.