

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

САВІН КОСТЯНТИН ГЕОРГІЙОВИЧ



УДК 621.382.414

**ПЕРЕЛАШТОВУВАНІ ЦИЛІНДРИЧНІ
МЕТАЛО-ДІЕЛЕКТРИЧНІ РЕЗОНАТОРИ НВЧ**

05.27.01 — твердотільна електроніка

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ — 2017

Дисертація є рукописом

Робота виконана у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України на кафедрі фізичної та біомедичної електроніки

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент,
Прокопенко Юрій Васильович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
доцент кафедри фізичної та біомедичної електроніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Прокопенко Юрій Володимирович,
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України,
провідний науковий співробітник відділу радіофізики твердого тіла

кандидат технічних наук,
Глушеченко Едуард Миколайович,
ПАТ НВП «Сатурн», начальник відділу

Захист відбудеться «27» червня **2017 р. о 14 годині 30 хв.**

на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.08 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, вул. Політехнічна, 16, ауд. 412.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «25» травня 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради,
к.т.н., доцент



В. Г. Артюхов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Невпинний прогрес бездротових технологій призвів до великого розмаїття існуючих мережевих протоколів з різними радіочастотними характеристиками: Bluetooth, Wireless USB, Wi-Fi, LTE. Варто зазначити, що більшість з цих протоколів не конкурують між собою, а доповнюють одне одного. В результаті, все частіше виникає потреба одночасної підтримки декількох протоколів. Очевидним рішенням є створення універсального селективного пристрою, здатного перелаштовуватися під частотні характеристики усіх необхідних протоколів. Резонатори НВЧ є основою сучасних селективних пристроїв. Відповідно, розробка перелаштовуваних резонаторів постає актуальним завданням.

Як резонансний елемент у пристроях прийому-передачі даних широко використовуються метало-діелектричні резонатори (МДР). Основними перевагами МДР є висока добротність та мініатюрність.

Одним з найперспективніших методів перелаштування резонансної частоти є електромеханічний. Цей підхід забезпечує можливість досягти широкого діапазону перелаштування та, водночас, зберегти добротність вихідного резонансного елемента.

Поєднання технологій МДР та електромеханічного перелаштування дозволить створити мініатюрний резонансний елемент із широким робочим діапазоном частот та високою добротністю. Це стає можливим в результаті внесення до конструкції МДР керованої повітряної неоднорідності між діелектриком та металевою пластиною. У такому випадку зміна товщини цієї неоднорідності на відсотки товщини діелектрика призводить до перелаштування резонансної частоти на десятки відсотків.

Варто зазначити, що внесення неоднорідності до конструкції МДР призводить до суттєвих змін у структурі електромагнітного поля резонатора, а відповідно й до зміни резонансних частоти і добротності. Тому, актуальним стає дослідження впливу фізико-топологічних параметрів МДР з неоднорідністю на його частотні та енергетичні характеристики.

У дисертації розглядаються принципи застосування МДР з повітряною неоднорідністю між діелектриком та металевою пластиною для побудови перелаштовуваних резонансних елементів НВЧ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконані у роботі дослідження є продовженням робіт, що проводилися кафедрою фізичної та біомедичної електроніки факультету електроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського відповідно до програми наукових досліджень кафедри, включаючи НДР "Розроблення нових методів дослідження нанорозмірних плівок (EuTiO_3 , BiFeO_3 , DyScO_3 та ін.) для потреб наноприладів НВЧ та спінтроніки", номер державної реєстрації № 0111U003086.

Мета і завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є виявлення закономірностей впливу фізико-топологічних параметрів перелаштовуваних циліндричних метало-діелектричних

резонаторів на їх резонансні характеристики, такі як частота, добротність та коефіцієнт зв'язку з лінією передачі.

Для досягнення поставленої мети розв'язуються такі задачі:

- розроблення методики розрахунку резонансної частоти та добротності перелаштовуваного циліндричного метало-діелектричного резонатора відкритого та екранованого типів на основі методів часткових областей та скінченних інтегралів;
- розроблення комплексу алгоритмів і обчислювальних процедур, що дозволяють отримати залежності резонансної частоти, власної добротності та коефіцієнта зв'язку з лінією передачі від геометричних та електрофізичних параметрів перелаштовуваного циліндричного метало-діелектричного резонатора;
- розроблення експериментального прототипу перелаштовуваного циліндричного метало-діелектричного резонатора та дослідження його характеристик;
- аналіз залежностей резонансних характеристик перелаштовуваних циліндричних метало-діелектричних резонаторів, таких як частота, добротність та коефіцієнт зв'язку з лінією передачі, від їх геометричних та електрофізичних параметрів, а також впливу зовнішніх факторів, зокрема температури.

Об'єктом дослідження є перелаштовувані циліндричні метало-діелектричні резонатори.

Предметом дослідження є резонансні характеристики перелаштовуваних циліндричних метало-діелектричних резонаторів, такі як частота, добротність та коефіцієнт зв'язку з лінією передачі.

Методи дослідження:

- методи теорії електромагнітного поля використовувалися для побудови математичної моделі перелаштовуваних циліндричних метало-діелектричних резонаторів;
- чисельні методи розв'язання крайових задач використовувалися для побудови обчислювальних алгоритмів та процедур;
- метод часткових областей використовувався для розрахунку частотних характеристик перелаштовуваних циліндричних метало-діелектричних резонаторів та їх власної добротності;
- метод скінченних інтегралів використовувався для розрахунку навантаженої добротності перелаштовуваних циліндричних метало-діелектричних резонаторів;
- панорамний метод вимірювання частотних характеристик використовувався для верифікації розрахунків та дослідження експериментального прототипу перелаштовуваного резонансного елемента.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше розв'язано електродинамічну задачу про власні коливання складеного циліндричного метало-діелектричного резонатора методом часткових областей та розроблено методику розрахунку його резонансних характеристик, що

дозволило встановити закономірності впливу фізико-топологічних параметрів резонатора на розподіл електромагнітного поля, його резонансну частоту та добротність для випадку тонких діелектричних неоднорідностей.

2. Вперше показано високу чутливість резонансних частот циліндричного метало-діелектричного резонатора до зміни товщини повітряної неоднорідності для нижчих *ТМ*- та *НЕ*-типів коливань, що дозволяє перелаштовувати резонансну частоту на десятки відсотків переміщенням металевої пластини на одиниці відсотків висоти діелектричного циліндра.

3. Вперше показано, що власна добротність та коефіцієнт зв'язку з лінією передачі екранованого циліндричного метало-діелектричного резонатора не погіршуються зі зростанням товщини повітряної неоднорідності для нижчого типу коливань, що дозволяє створювати перелаштовувані резонансні елементи без підвищення втрат електромагнітної енергії.

4. Вперше встановлено залежності характеристик перелаштування резонансної частоти і добротності циліндричного метало-діелектричного резонатора з повітряною неоднорідністю від його фізико-топологічних параметрів для нижчого типу коливань, що дозволяє оптимізувати характеристики резонансного елемента.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено комплекс алгоритмів і обчислювальних процедур для розрахунку резонансних характеристик перелаштовуваних циліндричних метало-діелектричних резонаторів, таких як частота, добротність та коефіцієнт зв'язку з лінією передачі, який може бути використано для аргументованого вибору технічних рішень при проектуванні резонансних елементів НВЧ.

2. Запропоновано спосіб перелаштування резонансних частот метало-діелектричного резонатора для нижчих *ТМ*- та *НЕ*-типів коливань на десятки-сотні відсотків при збільшенні товщини повітряної неоднорідності на одиниці-десятки відсотків від висоти діелектричного циліндра, який супроводжується зростанням його власної добротності та коефіцієнта зв'язку з лінією передачі, що може бути використано для розроблення високодобротних перелаштовуваних резонансних елементів з мікроелектромеханічним чи п'єзоелектричним керуванням.

3. Для нижчого типу коливань встановлено критерії підвищення чутливості резонансної частоти метало-діелектричного резонатора до зміни товщини повітряної неоднорідності та двох складових власної добротності, обумовлених відповідно діелектричними та металічними втратами, які можуть бути використані для оптимізації параметрів резонатора щодо вимог до резонансних характеристик.

4. Для нижчого типу коливань розраховано чутливості резонансної частоти екранованого перелаштовуваного циліндричного метало-діелектричного резонатора до зміни його фізико-топологічних параметрів і товщини повітряної неоднорідності, що дають змогу врахувати вплив зовнішніх факторів на частотні характеристики при проектуванні резонансних елементів НВЧ.

Особистий внесок здобувача.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі фізичної та біомедичної електроніки факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», під керівництвом д.т.н., доц. Прокопенка Ю. В. Частина результатів отримана при співробітництві з Католицьким університетом Лувена, м. Лувен, Бельгія.

У дисертаційній роботі узагальнено результати теоретичних та експериментальних досліджень, виконаних автором дисертації самостійно та у співавторстві.

Автором особисто одержано такі результати:

1. Запропоновано методику розрахунку резонансних характеристик перелаштовуваних циліндричних метало-діелектричних резонаторів, таких як частота, добротність та коефіцієнт зв'язку з лінією передачі, на основі методу часткових областей та методу скінченних інтегралів.

2. Розроблено комплекс алгоритмів і обчислювальних процедур, що дозволяють розрахувати резонансні характеристики перелаштовуваних циліндричних метало-діелектричних резонаторів, такі як частота, власна добротність та коефіцієнт зв'язку з лінією передачі.

3. Розроблено та досліджено експериментальні прототипи перелаштовуваних циліндричних метало-діелектричних резонаторів, проведено порівняння теоретичних розрахунків та експериментальних даних.

4. Проведено аналіз залежностей резонансних характеристик перелаштовуваних циліндричних метало-діелектричних резонаторів від їх геометричних та електрофізичних параметрів.

Апробація результатів дисертації

Основні результати дисертації доповідались та обговорювались на: 31-й, 32-й, 33-й, 34-й і 36-й міжнародних науково-технічних конференціях «Електроніка і нанотехнології» (2011, 2012, 2013, 2014, 2016 рр., м. Київ); 21-й і 23-й міжнародних конференціях "НВЧ техніка і телекомунікаційні технології «КрыМиКо» (2011 р., 2013 р., м. Севастополь); міжнародній конференції з обробки сигналів «SPS-2011» (2011 р., м. Ягранка, Польща); Другій Всеросійській науково-технічній конференції «Електроніка і мікроелектроніка НВЧ» (2013 р., м. Санкт-Петербург, Росія); міжнародних науково-технічних конференціях «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» (2013, 2014 рр., м. Київ,); 20-й міжнародній конференції з НВЧ, радарів та бездротових технологій «MIKON-2014» (2014 р., м. Гданськ, Польща); 15-й міжнародній конференції з математичного моделювання «МКММ-2014» (2014 р. м. Херсон); 13-й міжнародній конференції «Фізика діелектриків (Діелектрики 2014)» (2014 р., м. Санкт-Петербург, Росія).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 21 наукову працю, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях (з них 2 статті у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 1 патент України на корисну модель, 14 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура і зміст роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновку, викладених на 123 сторінках машинописного тексту, списку використаних джерел із 108 публікацій вітчизняної та зарубіжної літератури. Робота містить 52 ілюстрації, 2 таблиці. Загальний обсяг роботи — 144 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету, предмет, об'єкт та основні завдання дослідження, викладено наукову новизну роботи, показано практичну цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз наукових публікацій стосовно перелаштовуваних резонансних елементів, поставлено задачі дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** розглядаються теоретичні та експериментальні методи дослідження, які були використані для аналізу частотних та енергетичних характеристик перелаштовуваних циліндричних метало-діелектричних резонаторів: метод часткових областей (МЧО), метод скінченних інтегралів (МСІ) та панорамний метод вимірювання частотних характеристик.

Для узагальнення, було розглянуто топологію складеного МДР (рис. 1).

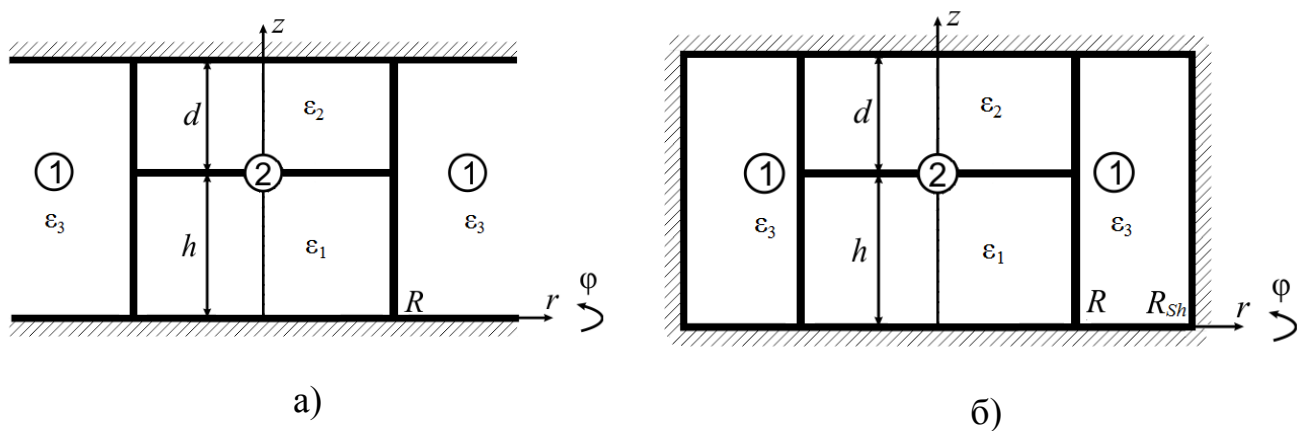


Рис. 1. Топологія складеного МДР: а) відкритого; б) екранованого.

Складений МДР складається з двох співвісних діелектричних циліндрів радіусом R , які мають товщини h та d і відносні діелектричні проникності ϵ_1 та ϵ_2 . Циліндри розміщені між двома металевими пластинами. Простір навколо циліндрів заповнений діелектриком з відносною діелектричною проникністю ϵ_3 . Усі діелектричні матеріали мають відносну магнітну проникність рівну одиниці ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$).

Екранований варіант додатково містить металеву стінку радіуса R_{sh} . Перелаштовуваний МДР представляє собою складений МДР за умови, що як діелектрики з проникностями ϵ_2 та ϵ_3 використане повітря, тобто $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 1$.

Розв'язання електродинамічної задачі за допомогою МЧО передбачає розділення об'єму резонатора на області 1 та 2, розділені поверхнею $r = R$. Електромагнітне поле в обох областях було описано через z -компоненти електричного та магнітного векторів Герца, розкладених по власних функціях відповідних областей.

Для виконання умов рівності z -компонент поля на поверхні $r = R$ вводяться невідомі функції $f^e(z)$ та $f^m(z)$, пропорційні напруженостям електричного та магнітного поля відповідно.

З умови рівності ϕ -компонент поля на поверхні $r = R$ одержується однорідна система інтегральних рівнянь Фредгольма 1-го роду:

$$\int_0^{h+d} (G_1^e(z, z') f^e(z') + G_1^m(z, z') f^m(z')) dz' = 0,$$

$$\int_0^{h+d} (G_2^e(z, z') f^e(z') + G_2^m(z, z') f^m(z')) dz' = 0,$$

де $G_1^{e(m)}(z, z')$ та $G_2^{e(m)}(z, z')$ — ядра інтегральних рівнянь, які виражаються через власні функції області 1 і 2 відповідно.

Система інтегральних рівнянь надалі розв'язується методом Гальоркіна. В результаті, електродинамічна задача зводиться до однорідної системи лінійних алгебраїчних рівнянь, яка у свою чергу розв'язується з використанням метода редукції. Використання для координатного та проекційного базисів таких функцій, що враховують особливості електромагнітного поля, дозволяє створити ефективний обчислювальний алгоритм, особливо для випадку тонких повітряних неоднорідностей.

Перевагою МЧО є те, що цей підхід призводить до матриць суттєво менших розмірностей ніж універсальні методи на основі просторового розбиття. Важливою особливістю МЧО є можливість розрахунку відкритого МДР. Недоліком МЧО є вимога осової симетрії, яка не дозволяє використовувати метод для обчислення зовнішньої добротності.

Метод скінченних інтегралів (МСІ) являє собою універсальний метод розв'язання електродинамічної задачі у певному скінченному об'ємі. МСІ передбачає поділ області розрахунку на скінченну кількість елементарних комірок. Найчастіше використовуються елементарні комірки у формі тетраедра або гексаедра. Комірки мають не перетинатися, але не лишати незаповненого простору. Після просторової дискретизації для кожної комірки застосовується система рівнянь Максвелла, яка надалі розширюється для всього колективу комірок. Розв'язання цієї системи дає змогу отримати частотні залежності параметрів матриці розсіювання. Визначення резонансної частоти f_p , власної добротності Q_0 та коефіцієнта зв'язку резонатора з вхідною та вихідною лініями K реалізовано шляхом розв'язання задачі апроксимації:

$$\min_{f_p, Q_0, K} \sum_{i=1}^n \left[\left| S_{21}^{\text{MSI}}(f_i) - S_{21}(f_i) \right|^2 + \left| S_{11}^{\text{MSI}}(f_i) - S_{11}(f_i) \right|^2 \right],$$

де $S_{11}^{\text{MCI}}(f_i)$, $S_{21}^{\text{MCI}}(f_i)$ — розраховані комплексні коефіцієнти відбиття та передачі на частоті f_i ; $S_{11}(f_i)$, $S_{21}(f_i)$ — комплексні коефіцієнти відбиття та передачі на тій же частоті, розраховані за формулами, які було отримано методами теорії кіл для зв'язаної системи:

$$\xi = Q_0 \left(\frac{f_i}{f_p} - \frac{f_p}{f_i} \right), \quad S_{11} = \frac{1 + j\xi}{1 + j\xi + K}, \quad S_{21} = \frac{K}{1 + j\xi + K},$$

де f_p — резонансна частота, ξ — узагальнене розналяштування частоти. Розраховані методами теорії кіл параметри матриці розсіювання було перераховано на площини портів МДР.

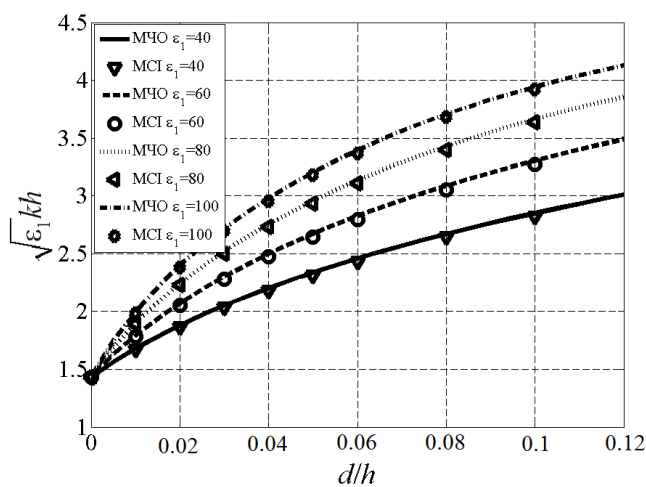


Рис. 2. Залежності нормованого хвильового числа екранованого складеного циліндричного МДР від нормованої товщини повітряної неоднорідності ($\epsilon_2 = \epsilon_3 = 1$) для TM_{010} -типу коливальних за різних значень відносної діелектричної проникності матеріалу циліндра, що розраховані МЧО та МСІ. Нормований радіус діелектричного циліндра $R/h = 2$, нормований радіус металевих екранів $R_{Sh}/R = 2$.

МСІ було використано для верифікації розрахунків, виконаних за допомогою МЧО. Спостерігається добре узгодження результатів (рис. 2). Крім того, МСІ було використано для обчислення зовнішньої добротності МДР.

Для верифікації теоретичних розрахунків також використано метод експериментального дослідження. Було побудовано прототип перелаштовуваного МДР. Основою прототипу є штатив, на якому закріплений мікрометричний гвинт Mitutoyo Digimatic Micrometer Head, Series 350. До голівки гвинта приєднано металевий циліндр, який відіграє роль верхньої металевої пластини резонатора. На штативі встановлено циліндричну металеву порожнину радіуса $R_{Sh} = 12$ мм, що моделює нижню пластину та екран перелаштовуваного МДР. Для зв'язку з вхідною та вихідною лініями використано два порти у металевому екрані з петлями зв'язку, що було

розміщено діаметрально напроти одне одного.

Для експериментального дослідження було використано два діелектричні циліндри з параметрами: 1) $R = 7$ мм, $h = 4,5$ мм, $\epsilon_1 = 37,7$; 2) $R = 5,5$ мм, $h = 5$ мм, $\epsilon_1 = 79$. Параметри матриці розсіювання прототипу було виміряно за допомогою аналізатора схем НВЧ N5247A PNA-X Microwave Network Analyzer. Обробку результатів проведено розв'язанням задачі апроксимації аналогічно до МСІ.

Порівняння результатів експерименту з теоретичними розрахунками наведено для TM_{010} - та TE_{011} -типів коливань МДР на рис. 3. Спостерігається гарне узгодження результатів.

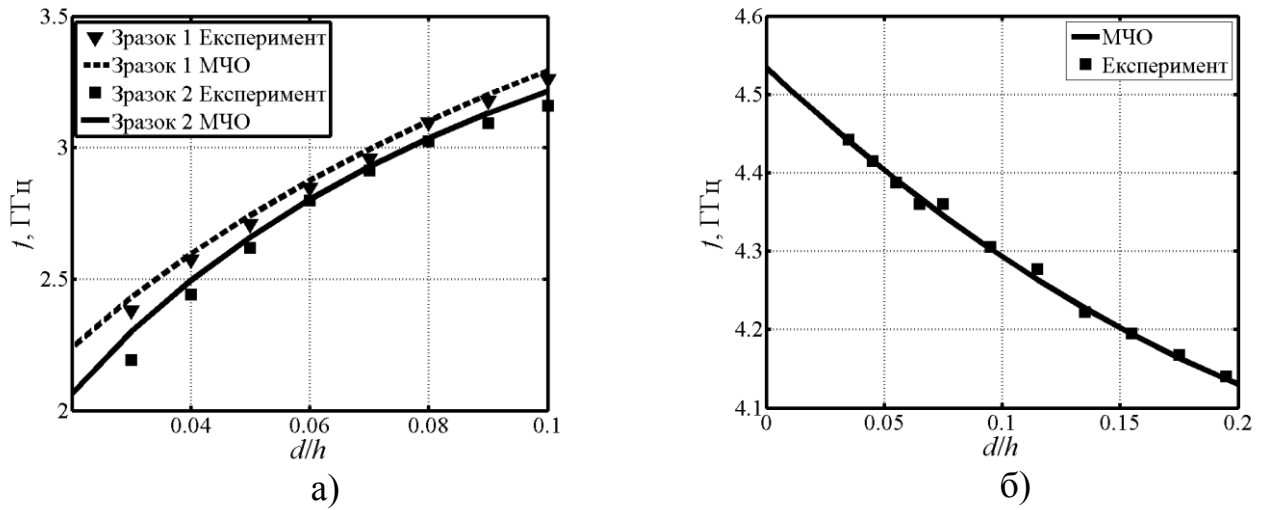


Рис. 3. Порівняння експериментальних та теоретичних частотних залежностей для а) TM_{010} - і б) TE_{011} -типів коливань МДР.

Було встановлено, що похибка експериментального вимірювання не перевищувала 1,5 %.

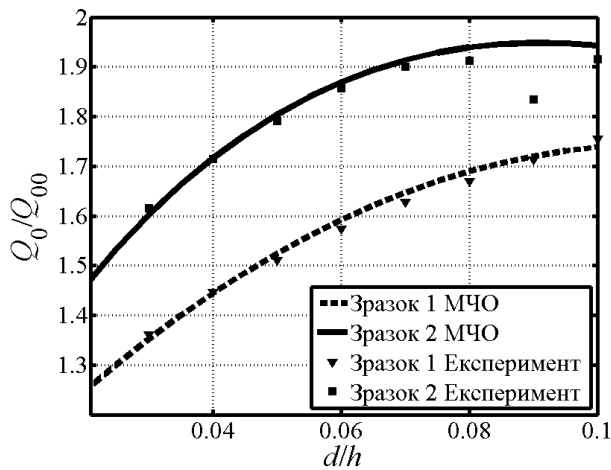


Рис. 4. Залежності нормованої власної добротності екранованого перелаштовуваного циліндричного МДР від нормованої товщини повітряної неоднорідності для TM_{010} -типу коливань, що розраховані МЧО та отримані експериментально для двох зразків діелектричних циліндрів (Q_{00} — власна добротність відповідного однорідного МДР).

Порівняння експериментально виміряної добротності МДР з теоретичними розрахунками наведено для TM_{010} -типу коливань на рис. 4. Експериментальні дані підтверджують теоретичні розрахунки.

Відмінність між теоретичними та практичними результатами при $d/h = 0,09$ для другого зразка можна пояснити тим, що TM_{010} -тип коливань близький до виродження з TM_{110} -типом за такої товщини повітряної неоднорідності, що призводить до погіршення власної добротності.

У третьому розділі було розглянуто частотні характеристики перелаштовуваних циліндричних МДР.

Досліджено розподіл аксіальної складової електричного поля уздовж радіальної координати (рис. 5).

Продemonстровано, що при появі повітряної неоднорідності між діелектриком та металевою пластиною

резонансна напруженість аксіальної компоненти електричного поля екранованого МДР у неоднорідності різко зростає порівняно з напруженістю електричного поля у циліндрі екранованого однорідного МДР для TM_{010} -типу коливань, але спадає зі зростанням товщини неоднорідності.

Таким чином, невеликими змінами товщини повітряної неоднорідності досягається значний перерозподіл електромагнітного поля в об'ємі резонатора. Це свідчить про високу чутливість резонансної частоти екранованого перелаштовуваного МДР до зміни товщини повітряної неоднорідності для TM_{010} -типу коливань.

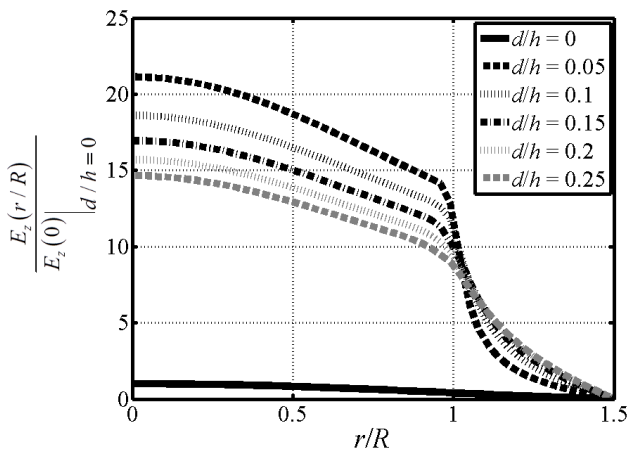


Рис. 5. Залежності нормалізованих резонансних амплітуд напруженості аксіальної компоненти електричного поля екранованого перелаштовуваного МДР в площині $z = h + d/2$ від нормованої радіальної координати для TM_{010} -типу коливань за різних значень нормованої товщини повітряної неоднорідності між металевою пластиною та діелектричним циліндром. Відносна діелектрична проникність матеріалу циліндра $\epsilon_1 = 30$, нормований радіус циліндра $R/h = 1$, нормований радіус металевого екрану $R_{Sh}/R = 1,5$.

що зменшення висоти діелектричного циліндру збільшує чутливість резонансної частоти екранованого МДР для нижчого TM_{010} -типу коливань та розширює діапазон перелаштування.

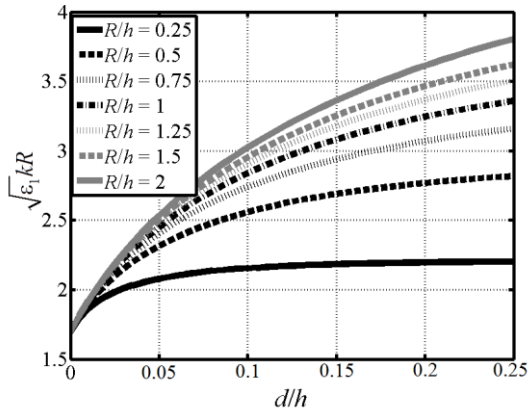
Показано, що існує оптимальне значення радіуса металевого екрану, яке забезпечує найбільший діапазон перелаштування резонансної частоти циліндричного МДР. При звуженні екрану перелаштовуваний циліндричний МДР починає

Було продемонстровано, що повітряна неоднорідність між металевою пластиною та діелектричним циліндром товщиною в одиниці-десятки відсотків висоти циліндра зміщує резонансну частоту перелаштовуваного МДР на десятки-сотні відсотків відносно однорідної конструкції для нижчих TM -та HE -типів коливань (рис. 6). Причиною є наявність домінантної аксіальної складової електричного поля у складі цих мод.

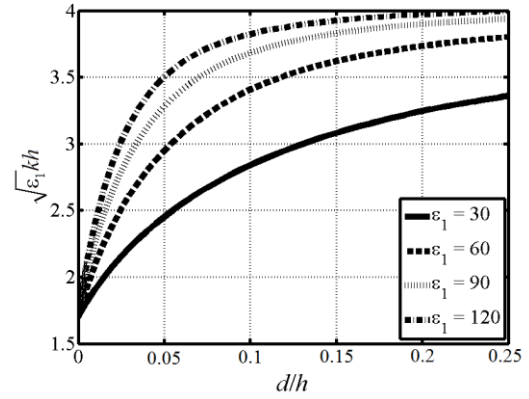
Було показано, що чутливість резонансної частоти екранованого перелаштовуваного МДР до зміни товщини повітряної неоднорідності невисока для таких типів коливань, що не мають домінантної аксіальної складової електричного поля.

Продemonстровано, що збільшення діелектричної проникності матеріалу циліндра знижує резонансну частоту однорідного МДР для TM_{010} -типу коливань та збільшує чутливість резонансної частоти перелаштовуваного МДР до товщини повітряної неоднорідності між циліндром та металевою пластиною. Було показано,

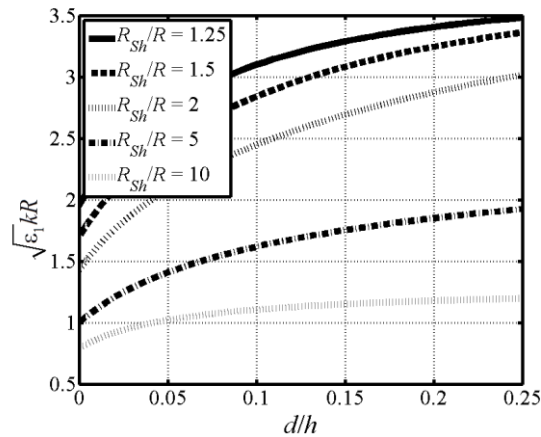
деградувати у об'ємний резонатор з металевими стінками, заповнений діелектричним матеріалом. При розширенні екрану перелаштовуваний циліндричний МДР починає деградувати у об'ємний резонатор з металевими стінками. Вказано, що величина оптимального радіуса металевого екрану збільшується при збільшенні висоти діелектричного циліндра.



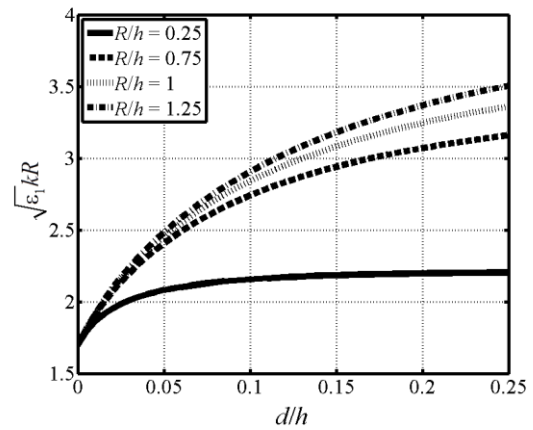
а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Залежності нормованого хвильового числа екранованого перелаштовуваного МДР від нормованої товщини повітряної неоднорідності для TM_{010} -типу коливань за різних значень: а) висоти діелектричного циліндра; б) діелектричної проникності матеріалу циліндра; в) радіуса металевого екрану; г) радіуса діелектричного циліндра.

Було проаналізовано можливість обмеження діапазону перелаштування резонансної частоти МДР для TM_{010} -типу коливань з боку сусідніх мод.

Розраховано чутливості резонансної частоти екранованого перелаштовуваного циліндричного МДР до зміни його геометричних та електрофізичних параметрів для TM_{010} -типу коливань (рис. 7). За допомогою цих чутливостей можливо врахувати вплив зовнішніх факторів на резонансну частоту МДР.

За допомогою розрахованих чутливостей було досліджено вплив температури на резонансну частоту МДР:

$$TKf = S_{\epsilon_1}^f TK\epsilon_1 + S_R^f TKR + S_h^f TKh + S_{R_{Sh}}^f TKR_{Sh} + S_d^f TKd.$$

На рис. 8 продемонстровано, що наявність повітряної неоднорідності значно підвищує температурну стабільність МДР.

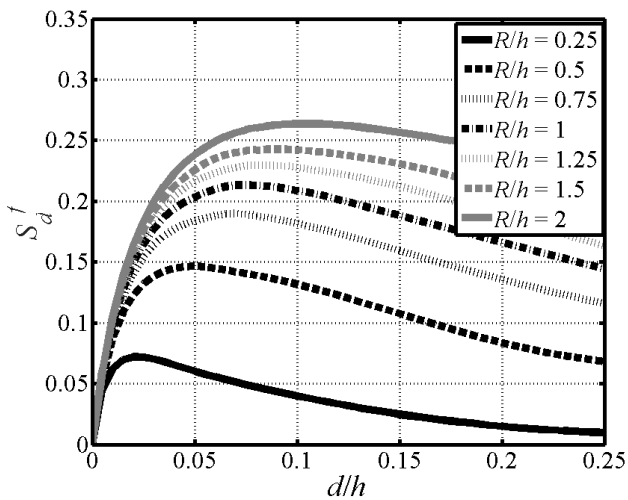


Рис. 7. Залежності чутливості резонансної частоти екранованого перелаштовуваного циліндричного МДР до зміни товщини повітряної неоднорідності від нормованої товщини повітряної неоднорідності за різних значень нормованої висоти діелектричного циліндра для TM_{010} -типу коливань. Відносна діелектрична проникність матеріалу циліндра $\epsilon_1 = 30$, нормований радіус металевого екрану $R_{Sh}/R = 1,5$.

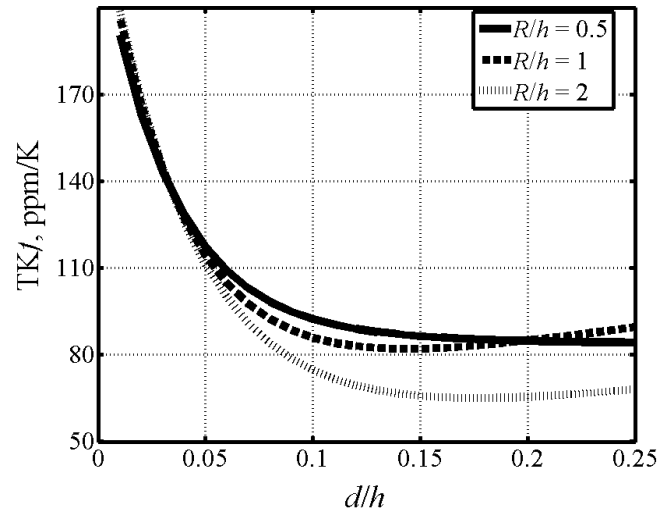


Рис. 8. Залежності температурного коефіцієнта резонансної частоти екранованого перелаштовуваного циліндричного МДР з від нормованої товщини повітряної неоднорідності за різних значень нормованої висоти діелектричного циліндра для TM_{010} -типу коливань. Відносна діелектрична проникність матеріалу циліндра $\epsilon_1 = 30$, нормований радіус металевого екрану $R_{Sh}/R = 1,5$.

У четвертому розділі було розглянуто добротність та коефіцієнт зв'язку перелаштовуваних циліндричних МДР.

Залежності нормованої добротності екранованого перелаштовуваного МДР, що обумовлена діелектричними втратами, від нормованої товщини повітряної неоднорідності для TM_{010} -типу коливань за різних значень геометричних та електрофізичних параметрів приведені на рис. 9.

Встановлено, що залежність власної добротності екранованих перелаштовуваних МДР, що обумовлена діелектричними втратами, від товщини повітряної неоднорідності між діелектричним циліндром та металевою пластиною має максимум для TM_{010} -типу коливань.

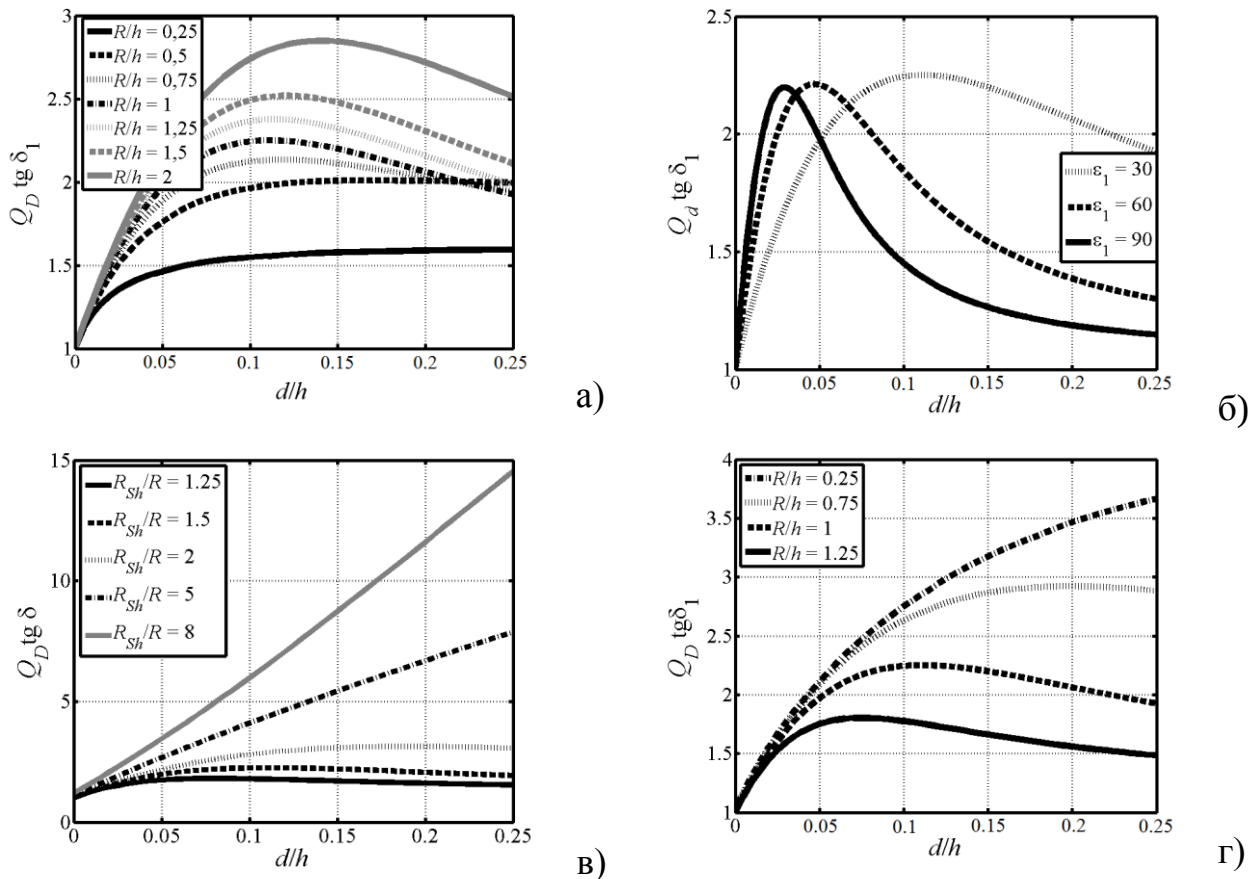


Рис. 9. Залежності нормованої добротності екранованого перелаштовуваного МДР, що обумовлена діелектричними втратами, від нормованої товщини повітряної неоднорідності для TM_{010} -типу коливань за різних значень: а) висоти діелектричного циліндра; б) діелектричної проникності матеріалу циліндра; в) радіуса металевого екрану; г) радіуса діелектричного циліндра.

Залежності нормованої добротності екранованого перелаштовуваного МДР, що обумовлена металевими втратами, від нормованої товщини повітряної неоднорідності для TM_{010} -типу за різних значень геометричних та електрофізичних параметрів коливань приведені на рис. 10.

Було продемонстровано, що власна добротність екранованих перелаштовуваних МДР зростає при збільшенні товщини повітряної неоднорідності між діелектричним циліндром та металевою пластиною для TM_{010} -типу коливань.

Було встановлено, що при використанні TM_{010} -типу коливань висота діелектричного циліндра перелаштовуваного екранованого МДР має бути обрана виходячи з компромісу між шириною частотного діапазону та величиною власної добротності, обумовленої діелектричними втратами, з одного боку, та величиною власної добротності, обумовленої металічними втратами, з іншого.

Показано, що при використанні TM_{010} -типу коливань радіус металевого екрану перелаштовуваного циліндричного МДР має бути обраний виходячи з компромісу між величиною власної добротності, обумовленої діелектричними втратами, з

одного боку, та величиною власної добротності, обумовленої металічними втратами, з іншого.

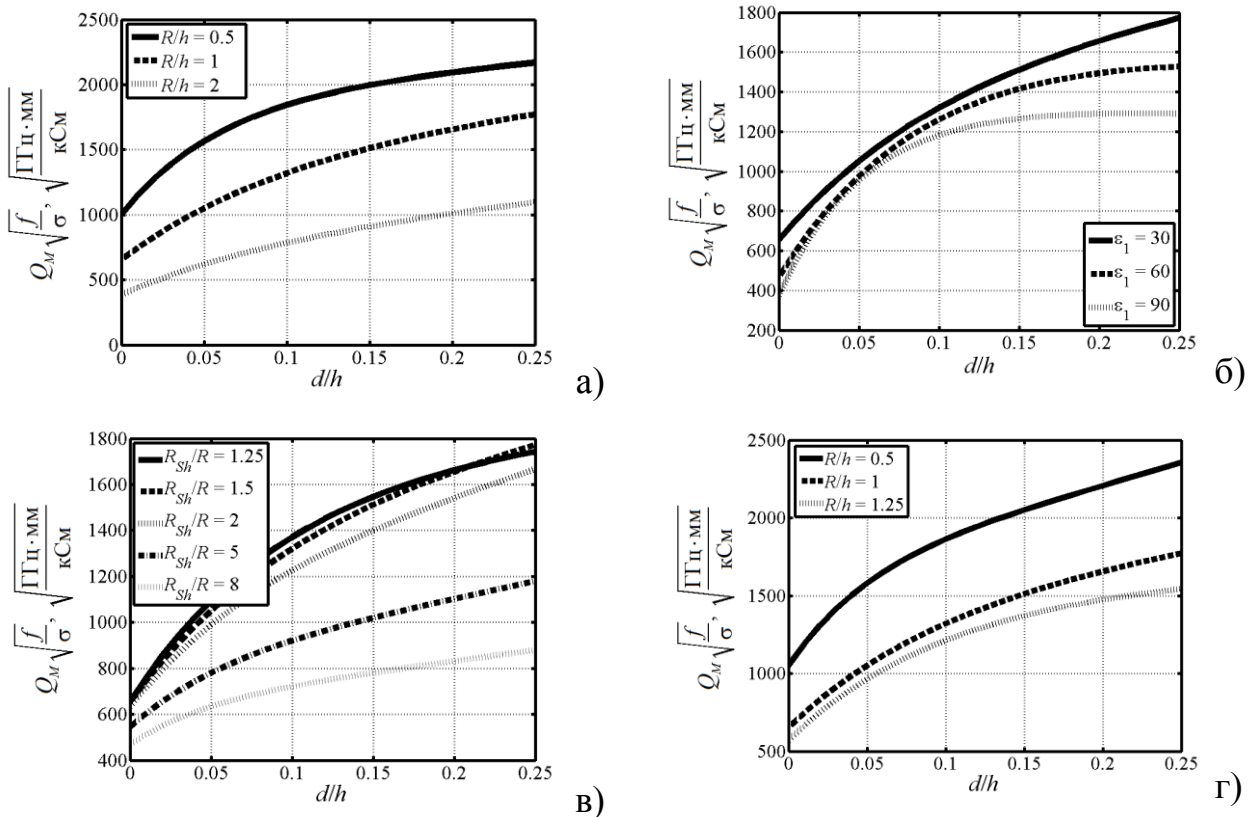


Рис. 10. Залежності нормованої добротності екранованого перелаштовуваного МДР, що обумовлена металевими втратами, від нормованої товщини повітряної неоднорідності для TM_{010} -типу коливань за різних значень: а) висоти діелектричного циліндра; б) діелектричної проникності матеріалу циліндра; в) радіуса металевого екрану; г) радіуса діелектричного циліндра.

Встановлено, що при використанні TM_{010} -типу коливань радіус діелектричного циліндра перелаштовуваного екранованого МДР має бути обраний виходячи з компромісу між власною добротністю та шириною частотного діапазону.

Було показано, що при використанні TM_{010} -типу коливань діелектрична проникність матеріалу діелектричного циліндра перелаштовуваного екранованого МДР має бути обрана виходячи з компромісу між шириною частотного діапазону та величиною власної добротності, обумовленої металічними втратами.

Продемонстровано, що збільшення товщини повітряної неоднорідності між металеву пластину та діелектричним циліндром призводить до зростання резонансного коефіцієнта зв'язку екранованого перелаштовуваного МДР з вхідною та вихідною лініями передач K_0 для TM_{010} -типу коливань (рис. 11).

Було встановлено, що збільшення площі петель зв'язку S_L без зміни площі діаметрального перерізу S_D підвищує резонансний коефіцієнт зв'язку екранованого циліндричного МДР з лінією передачі для TM_{010} -типу коливань за наявності повітряної неоднорідності.

Встановлено, що зменшення відстані між центром МДР та петлями зв'язку R_L без зміни їх площі підвищує резонансний коефіцієнт зв'язку екранованого циліндричного МДР з лінією передачі для TM_{010} -типу коливань за наявності повітряної неоднорідності.

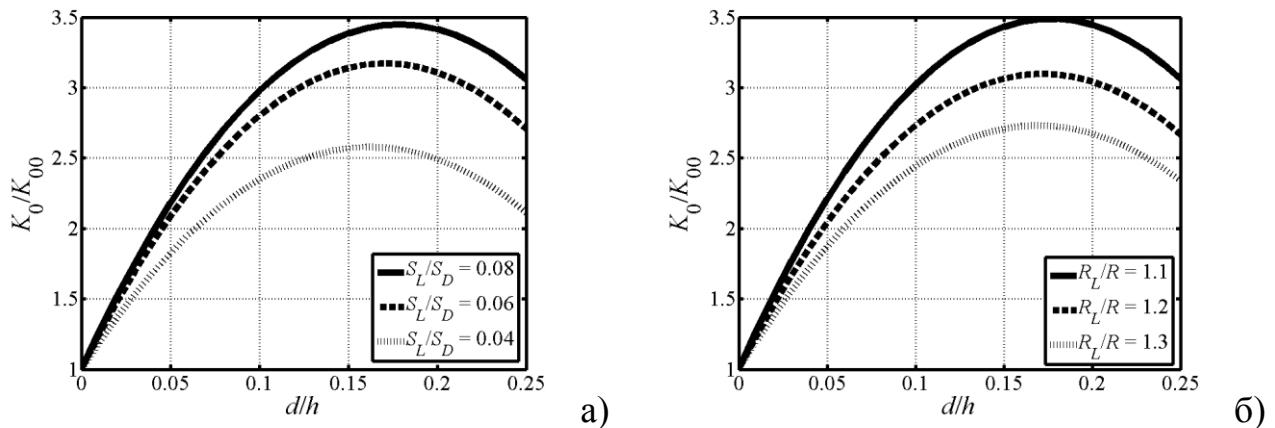


Рис. 11. Залежності нормованого резонансного коефіцієнта зв'язку перелаштовуваного МДР від нормованої товщини повітряної неоднорідності для TM_{010} -типу коливань за а) різної площі елементів зв'язку, б) різної форми елементів зв'язку. Нормований радіус діелектричного циліндра $R/h = 1$, нормований радіус металевого екрану $R_{sh}/R = 1,5$, відносна діелектрична проникність матеріалу циліндра $\epsilon_1 = 30$. K_{00} — резонансний коефіцієнт зв'язку відповідного однорідного МДР.

Було встановлено залежності граничної величини накопиченої енергії перелаштовуваного МДР від електричної міцності діелектричних матеріалів.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У роботі досягнуто таких наукових та практичних результатів.

1. Запропоновано методику розрахунку резонансних характеристик перелаштовуваних циліндричних МДР, таких як частота, добротність та коефіцієнт зв'язку з лінією передачі, на основі МЧО та МСІ. За допомогою МЧО розв'язано електродинамічну задачу про власні коливання складеного циліндричного МДР. Задачу зведено до системи однорідних інтегральних рівнянь Фредгольма 1-го роду, яка розв'язана методом Гальоркіна. МСІ було використано для обчислення зовнішньої добротності, коефіцієнта зв'язку з лінією передачі екранованого перелаштовуваного циліндричного МДР, а також для верифікації розрахунків МЧО. Розраховані теоретично характеристики підтверджено експериментально. На основі розробленої методики створено комплекс алгоритмів та обчислювальних процедур для розрахунку резонансних характеристик перелаштовуваних циліндричних МДР.

2. Показано, що наявність домінантної аксіальної компоненти електричного поля для даного типу електромагнітних коливань циліндричного МДР є ключовою умовою високої чутливості резонансної частоти. Запропоновано спосіб перелаштування резонансних частот МДР для нижчих TM - та HE -типів коливань.

Продemonстровано, що резонансна частота екранованого циліндричного МДР перелаштовується на десятки-сотні відсотків при зміні товщини повітряної неоднорідності на одиниці-десятки відсотків висоти діелектричного циліндра для TM_{010} -типу коливань.

3. Встановлено закономірність, що обидві складові власної добротності та коефіцієнт зв'язку з лінією передачі екранованого циліндричного МДР не погіршуються із зростанням товщини повітряної неоднорідності для нижчого TM_{010} -типу коливань.

4. Показано, що фізико-топологічні параметри екранованого перелаштовуваного циліндричного МДР мають бути обрані на основі компромісу між чутливістю резонансної частоти до товщини повітряної неоднорідності, та власною добротністю, що обумовлена діелектричними і металічними втратами. Зокрема, збільшення діелектричної проникності матеріалу циліндра та зменшення його висоти призводить до підвищення чутливості резонансної частоти та збільшення добротності, обумовленої діелектричними втратами, та одночасного зменшення добротності, що обумовлена металічними втратами.

5. Показано, що існує такий радіус екрану циліндричного МДР, який забезпечує найбільший діапазон перелаштування його резонансної частоти для нижчого TM_{010} -типу коливань. Звуження екрану наближає МДР до об'ємного металевого резонатора з діелектричним наповненням, а розширення екрану призводить до виродження МДР в об'ємний металевий резонатор.

6. Показано, що існує така товщина повітряної неоднорідності екранованого циліндричного МДР, яка забезпечує локальний максимум власної добротності для нижчого TM_{010} -типу коливань. Це може бути пояснено наявністю двох конкуруючих процесів: перерозподілу енергії електричного поля з діелектричного циліндра у повітряну неоднорідність та ефекту внутрішнього відбиття, який призводить до перерозподілу енергії з неоднорідності у циліндр.

7. Розраховано чутливості резонансної частоти екранованого перелаштовуваного циліндричного МДР до зміни його фізико-топологічних параметрів і товщини повітряної неоднорідності для нижчого TM_{010} -типу коливань. Це дозволяє врахувати вплив зовнішніх факторів на резонансну частоту.

8. Встановлено підвищення термостабільності резонансної частоти екранованого перелаштовуваного циліндричного МДР при збільшенні товщини повітряної неоднорідності для нижчого TM_{010} -типу коливань. Ефект може бути підсилений підбором лінійних розмірів та конструкційних матеріалів МДР.

9. Результати дисертації було впроваджено у виробництво вимірювальної техніки на фірмі “Теском”, м. Ільсан, Республіки Кореї., а також використано у НДР, що присвячена розробці нових методів дослідження нанорозмірних плівок ($EuTiO_3$, $BiFeO_3$, $DyScO_3$ та ін.) для потреб наноприладів НВЧ та спінтроники, номер державної реєстрації № 0111U003086.

Список опублікованих праць за темою дисертації:

1. Сергиенко П. Ю. Тестирование низкоэнергопотребляющего и высокоскоростного режимов работы устройств Bluetooth / П. Ю. Сергиенко, К. Г. Савин, Ю. В. Прокопенко // *Электроника и связь*. — 2010. — № 4. — С. 188—191.

Внесок дисертанта: аналіз вимог до частотних характеристик перелаштовуваних резонаторів для використання як селективного пристрою тестера режиму High Speed Bluetooth на базі платформи TESCOМ TC-3000C.

2. Сергиенко П. Ю. Перестраиваемые фильтры СВЧ на основе микрополосковой линии / П. Ю. Сергиенко, К. Г. Савин, Б. Б. Працюк, Ю. В. Прокопенко // *Электроника и связь*. — 2011. — № 4. — С. 53—56.

Внесок дисертанта: аналіз впливу товщини повітряного проміжку на ефективну діелектричну проникність структур «метал-повітря-діелектрик».

3. Савин К. Расчет резонансных частот составного металло-диэлектрического резонатора методом частичных областей / К. Г. Савин, Ю. В. Прокопенко, Ю. М. Поплавко // *Вісник Національного технічного університету України «КПІ»*. Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2013. — №55. — С. 24—33.

Внесок дисертанта: дослідження збіжності розв'язку задачі власних коливань складених циліндричних МДР методом часткових областей.

4. Савін К. Особливості знаходження власних частот складеного метало-діелектричного резонатора методом часткових областей / К. Г. Савін, Ю. В. Прокопенко // *Вестник ХНТУ*. — 2014. — № 3 (50). — С. 452—453.

Внесок дисертанта: розробка методики розрахунку резонансних характеристик екранованого перелаштовуваного МДР на основі МЧО.

5. Savin K. Quality Factor of Tunable Shielded Cylindrical Metal-Dielectric Resonator Caused by Dielectric Loss / K. Savin, V. Kazmirenko, Yu. Prokopenko // *ElectronComm*. — Vol. 19. — №5 (82). — PP. 14—16. (включена до бази Index Copernicus).

Внесок дисертанта: дослідження впливу геометричних параметрів МДР на його власну добротність, що обумовлена діелектричними втратами, для TM_{010} -типу коливань.

6. Савин К. Г. Расчет частотных и энергетических характеристик составного металло-диэлектрического резонатора методом частичных областей / К. Г. Савин, И. П. Голубева, Ю. В. Прокопенко // *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. — Т. 59. — № 5. — С. 47—55. (включена до бази Scopus).

Внесок дисертанта: аналіз протилежності вимог до геометричних та електрофізичних параметрів екранованих перелаштовуваних МДР щодо резонансної частоти та двох складових власної добротності для TM_{010} -типу коливань.

7. Патент на корисну модель №73422, Україна, МПК (2012.01) H01P 7/00. Термостабільний складений діелектричний резонатор / Працюк Б. Б., Прокопенко Ю. В., Савин К. Г., Сергієнко П. Ю.; власник Національний технічний

університет України "Київський політехнічний інститут". — u201202194; заявл. 24.02.2012; опублік. 25.09.2012, бюл. № 18.

Внесок дисертанта: аналіз впливу геометричних та електрофізичних параметрів структур з діелектричною неоднорідністю на температурну стабільність їх частотних характеристик.

8. Pratsiuk B. Improving of Dielectric Resonator Coupling with Rectangular Waveguide / B. Pratsiuk, K. Savin, P. Sergiyenko, Yu. Prokopenko // Proceedings of SPIE, 0277-786X. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. — 2011. — Vol. 8008. — PP. 800811-1—800811-6.

Внесок дисертанта: аналіз впливу металевих поверхонь на частотні характеристики структур з діелектричною неоднорідністю.

9. Sergienko P. Tunable Microwave Filters Based on Microstrip Line / P. Sergienko, K. Savin, B. Pratsiuk, Yu. Prokopenko // Proceedings of the 31st International Scientific Conference "Electronics and nanotechnology", 12—14 April 2011, Kyiv. — 2011. — P. 186.

Внесок дисертанта: аналіз впливу параметрів металевої поверхні на ефективну діелектричну проникність структур «метал-повітря-діелектрик».

10. Pratsiuk B. Improving of dielectric resonator coupling with rectangular waveguide / B. Pratsiuk, K. Savin, P. Sergiyenko, Y. Prokopenko // Signal Processing Symposium 2011 (SPS 2011), 8—10 June 2011, Jachranka Village. — 2011. — PP. 45—50.

Внесок дисертанта: аналіз впливу геометричних та електрофізичних параметрів метало-діелектричних структур з керованою неоднорідністю на їх частотні характеристики.

11. Savin K. Electromechanical Tuning of Microstrip Filters / K. Savin, P. Sergiyenko, B. Pratsiuk, Y. Prokopenko // Signal Processing Symposium 2011 (SPS 2011), 8—10 June 2011, Jachranka Village. — 2011. — PP. 199—204.

Внесок дисертанта: аналіз впливу діелектричної проникності матеріала діелектрика на ефективну діелектричну проникність структур «метал-повітря-діелектрик».

12. Savin K. Solution of Eigen Problem for Tunable Metal-Dielectric Resonator by Boundary Element Method / K. Savin, Ya. Kopyshchik, Yu. Prokopenko // Proceedings of the XXXII International Scientific Conference "Electronics and nanotechnology", 10—12 April 2012, Kyiv. — 2012. — PP. 13—14.

Внесок дисертанта: розробка методу аналізу відкритих складених циліндричних МДР на основі МЧО.

13. Савин К. Г. Расчет резонансных частот составного металло-диэлектрического резонатора методом частичных областей / К. Г. Савин, Ю. В. Прокопенко, Ю. М. Поплавко // Материалы международной научно-технической конференции «Радиотехнические поля, сигналы, аппараты и системы» РТПСАС-2013, 11—15 марта 2013, г. Киев. — 2013. — С. 97—98.

Внесок дисертанта: дослідження базисних функцій методу аналізу складених циліндричних МДР на основі МЧО.

14. Savin K. Mode Matching Technique for Tunable Shielded Cylindrical Metal-Dielectric Resonator / K. Savin, Yu. Prokopenko, G. A. E. Vandenbosch // Proceedings of the 33rd International Scientific Conference “Electronics and nanotechnology”, 16—19 April 2013, Kyiv. — 2013. — PP. 118—122.

Внесок дисертанта: розробка апаратно-програмного комплексу на основі МЧО для розрахунку частотних характеристик складених циліндричних МДР для різних типів коливань.

15. Савин К. Г. Собственные колебания составного металло-диэлектрического резонатора / К. Г. Савин, Ю. В. Прокопенко, Ю. М. Поплавко. // Сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 3—6 июня, 2013, г. Санкт-Петербург. — 2013. — С. У03-3-1—У03-3-5.

Внесок дисертанта: аналіз впливу електрофізичних параметрів МДР на частотні характеристики основного типу коливань.

16. Savin K. G. Mode Matching Technique Solution of Eigenproblem for Composite Metal-Dielectric Resonator / K. G. Savin, Yu. V. Prokopenko, Yu. M. Poplavko, G. A. E. Vandenbosch // 23rd Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, 9—13 September 2013, Sevastopol, Ukraine. — 2013. — PP. 644—645.

Внесок дисертанта: аналіз впливу геометричних параметрів МДР на частотні характеристики основного типу коливань.

17. Савин К. Г. Добротность цилиндрического экранированного составного металло-диэлектрического резонатора / К. Г. Савин, Ю. В. Прокопенко, Ю. М. Поплавко // Материалы международной научно-технической конференции «Радиотехнические поля, сигналы, аппараты и системы» РТПСАС-2014, 10—16 марта 2014, г. Киев. — 2014. — С. 138—140.

Внесок дисертанта: розробка методики розрахунку власної добротності, обумовленої металічними втратами, екранованого перелаштовуваного МДР на основі МЧО.

18. Savin K. Quality Factor of Tunable Shielded Cylindrical Metal-Dielectric Resonator / K. Savin, V. Kazmirenko, Y. Prokopenko // Proceedings of the 2014 IEEE 34th International Scientific Conference “Electronics and nanotechnology”, 15—18 April 2014, Kyiv. — 2014. — PP. 413—415.

Внесок дисертанта: аналіз впливу геометричних параметрів екранованого перелаштовуваного МДР на його власну добротність, що обумовлена металічними втратами, для TM_{010} -типу коливань.

19. Савин К. Г. Резонансные элементы на основе многослойных диэлектрических структур / К. Г. Савин, П. Ю. Сергиенко, Ю. В. Прокопенко // Материалы XIII международной конференции «Физика диэлектриков. Диэлектрики-2014», 2—6 июня, 2014 г., г. Санкт-Петербург. — Санкт-Петербург: Издательство РГПУ им. А. И. Герцена, 2014. — Т. 2. — С. 278—281.

Внесок дисертанта: аналіз впливу повітряної неоднорідності, перпендикулярної домінантній компоненті електричного поля, на резонансні характеристики багат шарових діелектричних структур.

20. Savin K. Calculation of Quality Factor of Tunable Shielded Cylindrical Metal-Dielectric Resonator Using Mode Matching Technique / K. Savin, P. Sergienko, I. Golubeva, Yu. Prokopenko // Proceedings of 20th International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON-2014), 16—18 June 2014, Gdansk. — 2014. — PP. 414—416.

Внесок дисертанта: розробка методики розрахунку власної добротності, обумовленої діелектричними втратами, екранованого перелаштовуваного МДР на основі МЧО.

21. Savin K. Thermal Stability of Shielded Cylindrical Metal-Dielectric Resonator / K. Savin, V. Kazmirenko, Yu. Prokopenko // Proceedings of the 2016 IEEE 36th International Scientific Conference “Electronics and nanotechnology”, 19—21 April 2016, Kyiv. — 2016. — PP. 151—153.

Внесок дисертанта: розрахунок чутливостей резонансної частоти екранованого перелаштовуваного циліндричного МДР до зміни його геометричних та електрофізичних параметрів для TM_{010} -типу коливань, аналіз термостабільності цього типу коливань.

АНОТАЦІЇ

Савін К. Г. Перелаштовувані циліндричні метало-діелектричні резонатори НВЧ. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.01 — твердотільна електроніка. — Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2017.

Дисертація присвячена дослідженню впливу фізико-топологічних параметрів перелаштовуваних циліндричних метало-діелектричних резонаторів на їх резонансні характеристики, такі як частота, добротність та коефіцієнт зв'язку з лінією передачі.

Запропоновано мікроелектромеханічний метод перелаштування резонансної частоти циліндричних метало-діелектричних резонаторів, що не призводить до погіршення їх власної добротності та коефіцієнта зв'язку з лінією передачі.

Запропоновано методику розрахунку резонансних характеристик перелаштовуваних циліндричних метало-діелектричних резонаторів, таких як частота, добротність та коефіцієнт зв'язку з лінією передачі, на основі методу часткових областей та методу скінченних інтегралів. Розроблено та експериментально досліджено прототип перелаштовуваного циліндричного метало-діелектричного резонатора.

Проаналізовано вплив геометричних та електрофізичних параметрів перелаштовуваного циліндричного метало-діелектричного резонатора на його частотні характеристики, власну добротність та коефіцієнт зв'язку з лінією передачі.

Ключові слова: метод часткових областей, циліндричний метало-діелектричний резонатор, перелаштовувані резонатори НВЧ, термостабілізація резонансної частоти, мікроелектромеханічне перелаштування резонансної частоти, частотні характеристики метало-діелектричного резонатора, власна добротність метало-діелектричного резонатора, коефіцієнт зв'язку метало-діелектричного резонатора з лінією передачі.

Савин К. Г. Перестраиваемые цилиндрические металло-диэлектрические резонаторы СВЧ. — Рукопись.

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук по специальности 05.27.01 — твердотельная электроника. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2017.

Диссертация посвящена исследованию влияния физико-топологических параметров перестраиваемых цилиндрических металло-диэлектрических резонаторов на их резонансные характеристики, такие как частота, добротность и коэффициент связи с линией передачи.

Предложен электромеханический метод перестройки резонансной частоты цилиндрических металло-диэлектрических резонаторов, который не приводит к ухудшению их собственной добротности и коэффициента связи с линией передачи.

Предложена методика расчета резонансных характеристик перестраиваемых цилиндрических металло-диэлектрических резонаторов, таких как частота, добротность и коэффициент связи с линией передачи, на основе метода частичных областей и метода конечных интегралов. Разработан и экспериментально исследован прототип перестраиваемого цилиндрического металло-диэлектрического резонатора.

Проанализировано влияние геометрических и электрофизических параметров цилиндрического металло-диэлектрического резонатора на его частотные характеристики, собственную добротность и коэффициент связи с линией передачи.

Ключевые слова: метод частичных областей, цилиндрический металло-диэлектрический резонатор, перестраиваемые резонаторы СВЧ, термостабилизация резонансной частоты, электромеханическая перестройка резонансной частоты, частотные характеристики металло-диэлектрического резонатора, собственная добротность металло-диэлектрического резонатора, коэффициент связи металло-диэлектрического резонатора с линией передачи.

Savin K. G. Tunable cylindrical metal-dielectric resonators. — Manuscript.

Ph.D. thesis on specialty 05.27.01 — solid-state electronics. — National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to research of the influence of physical and topological parameters of tunable cylindrical metal-dielectric resonator on its resonant characteristics such as frequency, quality factor and coupling coefficient between the resonator and transmission line.

The microelectromechanical tuning method for cylindrical metal-dielectric resonators is proposed. The method allows maintaining the unloaded quality factor and the coupling

coefficient between the resonator and transmission line of the initial resonant element over the whole tuning range.

The calculation technique for resonant characteristics of the tunable cylindrical metal-dielectric resonator is proposed. The technique allows calculation of resonant frequency, unloaded quality factor and coupling coefficient between the resonator and transmission line. The technique is based on the mode matching technique and finite integration technique. The prototype of the tunable cylindrical metal-dielectric resonator was developed. Its performance has been measured.

The influence of geometrical and electrical parameters of the tunable cylindrical metal-dielectric resonator on its frequency characteristics, unloaded quality factor and coupling coefficient between the resonator and transmission line has been analyzed.

Keywords: mode matching technique, cylindrical metal-dielectric resonator, tunable microwave resonators, thermal stability of resonant frequency, microelectromechanical tuning of resonant frequency, frequency characteristics of metal-dielectric resonator, unloaded quality factor of metal-dielectric resonator, coupling coefficient between the metal-dielectric resonator and transmission line.