

Голові спеціалізованої вченої ради Д 26.002.14
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського» доктору технічних наук,
професору Ільченку М. Ю.

03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. 1

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **ЛІТВІНЦЕВА Сергія Миколайовича**
«МЕТОДИ ПОБУДОВИ ТА СХЕМОТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ МІКРОСМУЖКОВИХ
СМУГО-ПРОПУСКНИХ ФІЛЬТРІВ», представлену на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 - Радіотехнічні
пристрої та засоби телекомунікацій

Актуальність теми дисертації

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі зі спрощення процесу розробки мікросмужкових смуго-пропускних фільтрів (СПФ), побудованих із відрізків ліній передачі, а також покращення їх селективності і розширення смуги загородження за рахунок вдосконалення існуючих, та розробки нових методів та схемотехнічних рішень.

Важливість вирішення сформульованої задачі обумовлена наступним.

На сьогоднішній день телекомунікаційні системи інтенсивно розвиваються у наданні сфери послуг, що розширюється, різним категоріям користувачів, у створенні нових систем зв'язку, навігації, в космосі і на землі, у розширенні спектра частот. Можна відзначити, наприклад, розвиток супутникової системи Starlink, яка вже сьогодні складається з більш ніж 4000 космічних апаратів з перспективою розвитку до 40000. Сигнали цієї системи доступні мільйонам користувачів. Інфраструктура телекомунікаційних систем потребує дедалі досконалішої елементної бази. У рейтингу мікросмужкових конструкцій для телекомунікаційних систем, приймачах і передавачах користувачів, селективні системи, що виділяють необхідний електромагнітний спектр, займають одне з перших місць.

Однією з ключових категорій селективних систем є смуго-пропускні фільтри, виготовлені з мікросмужкових резонаторів.

Розвиток телекомунікаційних систем пред'являє до фільтрів нові вимоги, реалізація яких у традиційних фільтрах часом не можлива. Ці вимоги стосуються підвищення вибіркової смуги пропускання, придушення паразитного спектру частот, контрольованої затримки сигналу, обмеження масо-габаритних характеристик.

Найбільш актуальні напрямки та шляхи покращення характеристик СПФ вбачаються такими:

- використання загальної матриці зв'язку для опису та оптимізації СПФ з резонаторами прохідного типу, що надасть можливість зробити їх частотні відгуки різноманітними;

- дослідження використання коефіцієнтів зв'язку між резонаторами, які вносять у частотні характеристики фільтрів додаткові нулі передачі, що забезпечує їм суттєві переваги, і робить їх більш різноманітними;

- цілеспрямоване включення до складу резонаторів зосереджених малогабаритних і високодобротних елементів, що відкриває нові можливості для СПФ, та необхідність розвитку методів побудови СПФ із зосереджено-розподіленим змішаним зв'язком;

- використання неоднорідних ліній передачі у двомодових резонаторах з метою розширення функціональних можливостей зазначених резонаторів та СПФ на їх основі.

Розвиток цих напрямів вимагає створення математичного апарату, моделювання та експериментальних досліджень, що і проводиться в опонованій роботі.

Додаткове підтвердження актуальності теми полягає в тому, що дисертаційні дослідження пов'язані із проведенням науково-дослідної роботи, у якій автор був співвиконавцем.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

В першому розділі на підставі моделювання та експериментальних вимірювань доведено, що матриця зв'язку, представлена в науково-технічних джерелах, недостовірно описує смуго-пропускні фільтри, з резонаторами прохідного типу. На підставі глибокого науково-аналітичного аналізу було виявлено причини недостовірності та розроблено рекомендації та правила модифікації матриці зв'язку, які були підтверджені експериментальними дослідженнями кількох різних видів фільтрів. Наукове узагальнення модифікації матриці зв'язку поширюється на СПФ з резонаторами прохідного типу і фільтри довільного порядку.

В розділі 2 розроблено теорію СПФ зі змішаними зв'язками, основою якої є новий метод синтезу СПФ зі змішаними зв'язками між суміжними резонаторами, заснований на використанні інверторів провідностей.

Аргументовано проаналізовано загальні закономірності СПФ зі змішаними зв'язками між резонаторами: досліджено лінійну складову змішаного коефіцієнту зв'язку, визначено розподіл нулів передачі на частотній характеристиці залежно від парних та непарних мод, сформульовано послідовність застосування створеного математичного апарату для синтезу фільтру.

Теоретичні положення підтверджені моделюванням.

У телекомунікаційних системах широко використовуються гребінчасті і решітчасті загороджуючі фільтри, які вимагають розширення смуги загородження. Виконання цих фільтрів із мікрохвильових резонаторів та

резонансних відрізків ліній передачі зустрічає певні труднощі. В даний час у промисловості з'явилися ємності та індуктивності, які ефективно застосовуються в мікрохвильових ланцюгах. Таким чином, з'явилася можливість конструювати мікрохвильові фільтри на комбінаціях зосереджених та розподілених елементів.

В розділі 3 дисертаційної роботи отримано нові методи розширення смуги загородження гребінчастих та решітчастих фільтрів із зосереджено-розподіленими параметрами.

В основу методів покладено ідею визначення координат включення в чвертьхвильовий та напівхвильовий резонатори вхідних та вихідних портів фільтра з метою оптимального розширення смуги загородження за рахунок придушення деяких резонансних частот, які є кратними основній резонансній частоті.

Розроблено та досліджено шлях зміщення антирезонансних частот чвертьхвильового резонатора при переміщенні координат підключення. Для підтвердження розробленого алгоритму визначення траєкторії зміщення антирезонансних частот чвертьхвильового резонатора при переміщенні координати підключень було досліджено модель фільтра за допомогою комп'ютерної програми Microwave Office (AWR). При моделюванні використана керамічна пластина з $\epsilon_r = 9,8$ завтовшки 1,905 мм. Центральна частота полоси пропускання фільтра $f_0 = 1,51$ ГГц. Паразитна смуга пропускання на частоті $3f_0$ придушена, що призвело до збільшення смуги загородження фільтра. Також було отримано та математично доведено закономірності координат підключення для отримання максимального ефекту розширення смуги загородження.

Розроблено та доведено математичний апарат для оцінки траєкторії зміщення антирезонансних частот напівхвильового резонатора при переміщенні координати підключення.

У роботі доводиться, що для забезпечення підвищеної односторонньої вибіркової СПФ можна використовувати змішані зв'язки між суміжними резонаторами, які забезпечують нулі передачі на дійсних частотах. Це положення підтверджується результатами моделювання та експериментальним гребінчастим фільтром другого порядку. Фільтр реалізовано на підкладці TMM-10i (Rogers), $\epsilon_r = 9,8$, $\text{tg}\delta = 0,002$, товщина якої $h = 1,905$ мм. У фільтрі використовуються резонатори $\lambda/4$ довжиною $L = 29,2$ мм та шириною $w = 3$ мм ($Z_0 = 38,4$ Ом). Коротке замикання на кінцях резонаторів виконано металізованими отворами діаметром 0,4 мм. Математична модель фільтра досліджувалась за допомогою Microwave Office (AWR), експериментальний зразок вимірювався за допомогою векторного аналізатора (Anritsu MS46112A, 1 МГц...20 ГГц). Розрахункові та експериментальні дані мають хорошу відповідність.

У дво- та багатодіапазонних системах зв'язку широко використовуються СПФ на двомодових резонаторах. Проте, реалізація двомодових резонаторів на регулярних відрізках ліній зустрічається з низкою проблемних питань, які

обмежують їх застосування. В розділі 4 запропоновано та реалізовано ідею розширення функціональних можливостей двомодових резонаторів за допомогою використання «ступінчато-імпедансного відрізка лінії передачі» та варіювання параметром відношення максимального та мінімального хвильового опору. Розвиваючи метод оптимізації резонаторів на двомодові резонансні структури, вдалося синтезувати ступінчасту лінію зі зменшеним відношенням максимального та мінімального хвильового опору.

Спочатку вирішена задача синтезу конструктивних елементів двомодових резонаторів із розімкненими кінцями та вивчено їх властивості. Потім синтезовано конструктивні елементи двомодових резонаторів із короткозамкненими кінцями, та досліджено їх властивості.

Завдяки «синтезу структурних елементів лінії передачі із ступінчастою зміною опору» вдалося досягти значного рознесення резонансних частот порівняно з традиційними рішеннями. Також вирішено задачу синтезу ступінчастої лінії передачі з двома короткозамкненими кінцями на заданих резонансних частотах.

Отримані аналітичні співвідношення розвивають теорію двомодових резонаторів, що дозволило визначити варіанти резонаторів, в яких одночасно існують і чергуються між собою двомодові та одномодові коливання, методом параметричного синтезу отримано резонатори, які мають розширені функціональні можливості: збільшену в 1,4 рази смугу загородження; зменшені в 1,3 рази розміри резонаторів при тих же резонансних частотах, що і при однорідних лініях передачі.

Для перевірки отриманих результатів, створено експериментальні зразки фільтрів (два зразки різного типу), та проведено порівняння результатів симуляції (застосовувався Microwave Office) та експерименту.

Достовірність наукових результатів

Достовірність отриманих в дисертаційній роботі наукових результатів підтверджується:

1. Коректною постановкою задачі, використанням відповідного математичного апарату і використанням вихідних даних, максимально наближених до реальних.
2. Використанням світового досвіду у формі детального аналітичного огляду наукових публікацій за тематикою дослідження.
3. Значною кількістю експериментальних даних, отриманих шляхом дослідження експериментальних зразків фільтрів і комп'ютерного моделювання, та порівняльним аналізом отриманих результатів з іншими методами;
4. Проведеною експертизою наукових результатів на предмет новизни та отриманими патентами.

Новизна одержаних результатів

Найбільш істотними новими науковими результатами дисертації є

- вдосконалено метод розрахунку мікросмужкових смуго-пропускних фільтрів на основі матриці зв'язків шляхом встановлення закономірності зміни знаків коефіцієнтів зв'язку, що дозволяє використовувати змінену матрицю зв'язку для обчислення частотних характеристик СПФ без будь-яких обмежень;

- вперше запропоновано новий метод аналітичного синтезу СПФ зі змішаними зв'язками між суміжними резонаторами, заснований на використанні інверторів провідностей, що дозволяє спростити конструкцію фільтрів із заданим рівнем селективності;

- вперше запропоновано новий метод розширення смуги загородження в мікросмужкових фільтрах, побудованих на чвертьхвильових та півхвильових резонаторах, який базується на аналізі траєкторій зміщення антирезонансних частот вказаних резонаторів, який дозволяє досягти придушення окремих паразитних смуг пропускання без використання додаткових фільтруючих елементів;

- запропоновано новий метод синтезу двомодових фільтрів зі ступінчастими резонаторами, який дозволяє отримати додаткові можливості вказаних резонаторів, а також побудувати двосмугові фільтри зі змінними параметрами.

Окремий науково-прикладний результат автора - аналітичний аналіз резонаторів, що замкнуті коротко по входу і виходу.

Аргументація і критичне оцінювання науково-технічних рішень наведених в дисертації

В дисертаційному дослідженні продемонстровано перевагу запропонованих нових науково-технічних рішень:

- правило зміни знаків в матриці зв'язку, яке полягає в тому, що необхідно змінити знак основного зв'язку, який прилеглий до «вільного» кінця прохідного резонатора, в результаті з'явилася можливість використовувати матрицю зв'язків при різних комбінаціях відбивних і прохідних резонаторів в СПФ;
- метод аналітичного синтезу СПФ зі змішаними зв'язками між суміжними резонаторами, заснований на використанні інверторів провідностей дозволяє спростити конструкцію фільтрів із заданим рівнем селективності;
- аналіз траєкторій зміщення антирезонансних частот шляхом зміни координат підключення відповідно до чвертьхвильових та півхвильових резонаторів дозволив створити методи розширення смуги загородження

- гребінчастих та решітчастих фільтрів із зосереджено-розподіленими параметрами;
- використання відрізків ліній передачі зі ступінчастою зміною імпедансу двомодових резонаторів та фільтрів на їх основі дозволило визначити варіанти резонаторів, в яких одночасно існують і чергуються між собою двомодові та одномодові коливання, які мають розширені функціональні можливості: збільшену в 1,4 рази смугу загородження, зменшені в 1,3 рази розміри резонаторів при тих же резонансних частотах, що і при однорідних лініях передачі.

Комп'ютерним моделюванням в середовищі Microwave Office та експериментальними дослідженнями за допомогою сучасної вимірювальної апаратури підтверджено достовірність основних положень, що використовуються при синтезі СПФ зі змішаними зв'язками між суміжними резонаторами.

Практичне значення дисертаційної роботи

Основні результати роботи складають науково-методологічну основу для покращення характеристик СПФ за рахунок зняття обмежень з матриці зв'язку, розробки оригінальних методик розрахунку та синтезу фільтрів зі змішаними зв'язками без застосування перехресних зв'язків, із зосереджено-розподіленими змішаними зв'язками між суміжними резонаторами з розширеною смугою загородження, модернізації двомодових резонаторів.

Робота містить експериментальну складову, під час якої виконано експериментальне тестування і проведена перевірка нових та удосконаленого методів розробки СПФ. Для перевірки некоректності використання матриці зв'язків створені і виміряні СПФ третього, четвертого, і п'ятого порядку із прохідним резонатором. Також створено і виміряно модифікований СПФ третього порядку для підтвердження запропонованого методу модифікації матриці зв'язків. Крім того, розроблено та створено гребінчастий СПФ другого порядку із зосереджено-розподіленими змішаними зв'язками, результати вимірювання якого підтвердили запроповану методику синтезу СПФ такого типу. Для перевірки визначених закономірностей, побудовано два двомодові фільтри з розімкнутими та замкнутими входом і виходом. Результати вимірювання цих прототипів підтвердили отримані залежності.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у КПІ ім. Ігоря Сікорського під час досліджень у межах НДП № 2213-ф «Створення теорії та схемотехнічних рішень немінімально-фазових планарних фільтрів зі змішаними зв'язками для засобів телекомунікацій».

Результати роботи можуть бути використані як при розробці нових фільтрів різного застосування, так і в навчальному процесі.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність у цілому, відповідність оформлення дисертації вимогам, затвердженим МОН України

Дисертація містить анотацію українською та англійською мовами, список публікацій здобувача (29 публ.), в яких опубліковані основні наукові результати дисертації. З них 16 статей, які входять до переліку видань, дозволених МОН України для публікацій результатів досліджень з технічних наук і міжнародні наукометричні бази SCOPUS та Web of Science, 10 праць наукових конференцій.

Основна частина роботи містить вступ, чотири розділи, список використаних джерел, три додатки.

Висновки, наукові та практичні результати дисертації в повній мірі відображують характер виконаних досліджень.

Робота достатньо проілюстрована графіками й рисунками, а стиль викладу матеріалів досліджень, наукових положень, висновків забезпечує доступність їх сприйняття.

Автореферат та основні положення дисертації за змістом є ідентичними.

Дисертація є завершеною науковою працею, оформленою відповідно до вимог, затвердженим МОН України.

Оцінка дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертаційна робота пройшла перевірку на унікальність тестового наповнення, яка засвідчила її відповідність принципам академічної доброчесності. Всі посилання на використані джерела оформлені коректно.

Оцінка мови та стилю викладення дисертації і автореферату

Мова та стиль дисертації та автореферату відповідають вимогам МОН України. Сформульовані у дисертаційній роботі основні положення, висновки та рекомендації викладені у логічній послідовності, і підтверджуються експериментальними даними, які порівнюються з еталонними значеннями. Викладення матеріалу дозволяє відслідковувати всі етапи постановки і проведення дослідження. Всі розділи дисертації мають внутрішню єдність і завершеність. Змістове наповнення підрозділів роботи відповідає змісту визначених розділів.

Отримані підсумкові результати дисертації співпадають із загальною метою і конкретними науковими завданнями, сформульованими у вступі. В цілому, дисертаційна робота сприймається як закінчена наукова праця, що містить нові наукові результати.

Підтвердження повноти викладу основних результатів дисертації в наукових фахових виданнях

Наукова новизна достатня для кандидатської дисертації. По тематиці дисертації опубліковано 16 статей, які проіндексовані в міжнародних наукометричних базах SCOPUS та Web of Science (із них 7 статей

опубліковано в журналах першого квартилю Q1), і входять до переліку видань, дозволених МОН України для публікацій результатів досліджень з технічних наук, 3 патенти України на корисну модель.

Структура і обсяг дисертації

Дисертація містить анотації на українській та англійській мовах, список публікацій здобувача за розділами, та складається зі вступу, чотирьох розділів (основних), висновків, списку використаних джерел (103 найменування), і трьох додатків (розділ 5).

Загальній обсяг роботи – 131 стор. (з них основний текст – 111 стор., список використаних джерел – 9 стор., додатки – 3 стор., 46 рисунків, 4 таблиці).

Апробація результатів дисертації

Результати дисертації у 2019–2022 рр. доповідалися та обговорювалися на 10 наукових та науково-технічних міжнародних конференціях і симпозиумах, які входять в наукометричну базу Scopus и платформу IEEE Xplore, що відображено в збірниках тез і матеріалах.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації

Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертації і дає повне уявлення про отримані результати дослідження та їх наукову новизну та практичну значимість.

В авторефераті і дисертації відображений внесок здобувача в наукові роботи, виконані у співавторстві.

Стиль викладу дисертації і автореферату науковий. Назва дисертації відповідає змісту і паспорту спеціальності 05.12.13 — Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

Проте дисертація не позбавлена недоліків:

1. В дисертаційній роботі не визначено межі застосування розроблених та модифікованого методу як з боку понад високих частот, так і в області низьких частот.
2. При аналізі та дослідженні гребінчастого фільтра (рис. 3.2) автор використовує «характеристику внесених втрат». Невідомо яка необхідність введення цього параметра, оскільки на початку розділу зроблено застереження, що аналізується ланцюг без дисипативних втрат. Далі даючи опис фільтра (рис. 3.2) вказується, що його КСВН менше 1,5. А в якій смузі? Поблизу частоти f_0 чи смузі загородження теж? А що на потрійній частоті, заради якої і спроектовано фільтр?
3. Автор говорить, що у табл. 3.1 наведено закономірність між кількістю спеціальних точок, що використовуються у гребінчастому СПФ, і максимально можливим значенням відношення частот. Закономірність там справді є, але хотілося б мати пояснення, чому вона саме така. Те саме стосується і табл. 3.2 для напівхвильових резонаторів.

4. У роботі не досліджені фазочастотні характеристики фільтрів і не наведена причина, через яку цей параметр відсутній.
5. В дисертації основна увага приділена параметрам фільтрів у верхній частині діапазону, в той же час даних про характеристики фільтрів зліва від резонансної частоти не наводиться.
6. Однією і тією ж літерою позначені різні змінні: перепад хвильових опорів і елементи матриці.

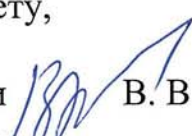
Зазначені зауваження в цілому не знижують високий рівень дисертаційної роботи і одержаних автором результатів.

Висновок

Дисертація Літвінцева С. М. «Методи побудови та схемотехнічні рішення мікросмушкових смуго-пропускних фільтрів» є закінченою науковою працею, у якій вирішено актуальну науково-технічну задачу зі спрощення процесу розробки мікросмушкових смуго-пропускних фільтрів, побудованих із відрізків ліній передачі, а також покращення їх селективності і розширення смуги загородження за рахунок вдосконалення існуючих, та розробки нових методів та схемотехнічних рішень, що має теоретичне та практичне значення, виконана із дотриманням принципів академічної доброчесності, повністю відповідає паспорту спеціальності: 05.12.13 – Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій, та вимогам п. 10 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор, **Літвінцев Сергій Миколайович** заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 — Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

Офіційний опонент

професор кафедри аеронавігаційних систем
Національного авіаційного університету,
доктор технічних наук, професор

Заслужений машинобудівник України  В. В. Конін



Підпис гр.  **Лемішчук М.**
засвідчую
Почесний секретар
Національного авіаційного університету