

Г.О. Мірських, к.т.н., доц.
О.І. Рибін, д.т.н., проф.

Національний технічний університет України "КПІ"

МІКРОХВИЛЬОВІ СМУГОВО-ПРОПУСКНІ ФІЛЬТРИ ГІБРИДНИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ НА ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРАХ

У роботі розглянуто принципи побудови мікрохвильових смугово-пропускних фільтрів на основі мікросмужкових ліній передачі з відкритими діелектричними резонаторами. Запропоновано принципи побудови таких фільтрів, які надають можливість суттєво знизити рівень передачі енергії в паразитних смугах пропускання, що властиві фільтрам на діелектричних резонаторах. Наведено результати експериментальних досліджень.

Вступ. На сьогодні переважна більшість мікрохвильових пристроїв низького та середнього рівнів потужності виконується у вигляді гібридних інтегральних схем (ГІС). У зв'язку з цим актуальним стає завдання пошуку схемотехнічних рішень, придатних для реалізації згідно з відповідними технологічними процесами. Характерною особливістю ГІС дециметрового та сантиметрового діапазонів довжин хвиль є використання як базових елементів мікросмужкових ліній передачі. Відомо, що недоліком таких ліній передачі є значний рівень дисипативних втрат, який суттєво обмежує діапазон вихідних параметрів пристроїв. Вказана особливість мікросмужкових ліній передачі чи не найбільшою мірою відображається на характеристиках частотно-вибіркових пристроїв, зокрема смугово-пропускних фільтрів (СПФ). Встановлено, що при використанні мікросмужкових ліній передачі як резонансних елементів недоцільно будувати фільтри зі смугою пропускання менше 5 %, що далеко не завжди задовольняє потреби практики. Це стимулювало пошук нових типів резонансних елементів, що визначаються високою власною добротністю та придатні для використання в ГІС. Серед таких елементів виділяються діелектричні резонатори (ДР), власна добротність яких сягає тисяч одиниць [1]. Висока добротність та простота електромагнітного зв'язку з мікросмужковою лінією передачі роблять ДР перспективним елементом ГІС. Однак смугово-пропускні фільтри, що виконані на базі таких резонаторів, мають, як правило, вузьку (декілька процентів) робочу смугу пропускання та значну кількість додаткових (паразитних) смуг пропускання. Ці паразитні смуги обумовлені фізичною природою резонансних явищ у ДР. Вони суттєво погіршують характеристики СПФ у смузі загородження, що нерідко унеможлиблює їх використання (наприклад, у підсилювально-множильних трактах синтезаторів частот). Зазначимо, що паразитні смуги пропускання спостерігаються і у СПФ, виконаних на відрізках мікросмужкових ліній, однак при цьому їх кількість зазвичай значно менша, а відстроювання від робочої смуги пропускання більше, ніж при використанні ДР.

Основна частина. **Принцип зменшення рівня передачі енергії в паразитних смугах пропускання фільтрів на діелектричних резонаторах.** Відомі [1] методи зменшення рівня передачі в паразитних смугах пропускання СПФ на ДР спрямовані на ускладнення самих резонаторів і погано суміщаються з технологією ГІС, призводять до ускладнення конструкції, збільшення обсягів робіт з виготовлення та налаштування фільтрів. Тому становить практичний інтерес пошук інших, вільних від вказаних недоліків, методів покращання характеристики СПФ ГІС у смузі загородження. Проведені нами дослідження показують, що для побудови СПФ ГІС з жорсткими вимогами до рівня передачі в паразитних смугах пропускання та широким діапазоном значень ширини робочої смуги пропускання доцільно використати комбінацію фільтрів, що виконані на основі як відрізків мікросмужкових ліній, так і ДР. Одним з можливих шляхів побудови комбінованих СПФ є каскадне з'єднання фільтрів, перший з яких виконано на відрізках мікросмужкових ліній, а другий – на основі ДР.

Можна виділити два принципово різні способи формування амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) комбінованого СПФ.

Перший спосіб полягає в тому, що смуга пропускання комбінованого фільтра формується за допомогою ДР, при цьому фільтр на основі мікросмужкових ліній використовується лише для зменшення рівня передачі в паразитних смугах пропускання, обумовлених фізикою резонансу ДР.

Другий спосіб полягає у тому, що смуга пропускання комбінованого фільтра формується мікросмужковими резонаторами, при цьому ДР використовуються переважно для звуження смуги пропускання.

Перший спосіб формування АЧХ комбінованого СПФ можна реалізувати каскадним з'єднанням СПФ, виконаного на основі ДР та фільтра нижніх частот (або СПФ), виконаного на основі

мікросмужкових ліній, а другий – каскадним з'єднанням двох СПФ, один з яких виконаний на мікросмужкових лініях, а другий – на ДР.

Експериментальне дослідження комбінованих смугово-пропускних фільтрів. З метою підтвердження ефективності реалізації смугово-пропускних фільтрів ГПС, згідно з наведеним принципом, та виявлення особливостей їх проектування за умови використання того чи іншого способу формування АЧХ були проведені відповідні експериментальні дослідження в дециметровому та довгохвильовій області сантиметрового діапазонів довжин хвиль.

Комбінований смугово-пропускний фільтр, виконаний на основі каскадного з'єднання мікросмужкового фільтра нижніх частот та СПФ на діелектричних резонаторах.

У такому комбінованому фільтрі смуга пропускання формується за допомогою діелектричних резонаторів, а фільтр нижніх частот (ФНЧ) використовується для зменшення рівня передачі в паразитних смугах пропускання. При цьому до характеристики ФНЧ мають висуватися відповідні вимоги, а саме:

- частота зрізу ($f_{зр.}$) має розміщуватися (вздовж осі частот) вище верхньої границі робочої смуги пропускання, але нижче нижньої границі найближчої паразитної смуги пропускання;
- ширина смуги загородження має відповідати вимогам, що висувуються до смуги загородження комбінованого фільтра;
- має бути забезпечений мінімальний рівень втрат на частотах $f < f_{зр.}$ та рівень втрат не менше того, що необхідний для відповідного зниження рівня передачі в паразитних смугах пропускання фільтра на ДР при частотах $f > f_{зр.}$.

Під час проектування ФНЧ слід враховувати, що викривлення АЧХ у смузі пропускання комбінованого фільтра будуть тим менші, чим менший рівень допустимих пульсацій АЧХ ФНЧ при $f < f_{зр.}$. Крім того, для ефективного зниження рівня паразитних смуг пропускання смуга загородження ФНЧ має бути достатньо широкою – відповідати технічним вимогам до СПФ. Відомо, що для ФНЧ, який виконаний у вигляді каскадного з'єднання відрізків мікросмужкових ліній з високим та низьким хвильовими опорами, відстроювання паразитної смуги пропускання від частоти зрізу визначається відношенням цих опорів. Однак можливості збільшення цього відношення обмежені не тільки технологічними факторами, але й помітним впливом на характеристику ФНЧ дифракційних явищ у місцях з'єднання мікросмужкових ліній з високим та низьким хвильовими опорами, що разом з випромінюванням електромагнітної енергії високоомними відрізками лінії передачі призводить до збільшення втрат, внесених ФНЧ при частотах $f < f_{зр.}$.

На рисунку 1 наведена АЧХ (крива 1) комбінованого СПФ, побудованого на базі каскадного з'єднання смугово-пропускного фільтра на ДР та мікросмужкового ФНЧ.

Фільтр виконаний на підкладці з відносною діелектричною проникністю $\varepsilon = 9,8$. АЧХ фільтра нижніх частот, який містить 7 каскадно включених відрізків мікросмужкових ліній передачі, на рисунку 1 представлена кривою 2. Смугово-пропускний фільтр був побудований на двох дискових ДР ($\varepsilon = 85$), розміщених біля розімкнених країв відрізків мікросмужкових ліній. АЧХ цього фільтра представлена на рисунку 1 кривою 3.

Розроблений СПФ забезпечує резонансні втрати 3,5 дБ при смузі пропускання 3 %. Втрати в паразитних смугах пропускання перевершують 30 дБ у смузі частот від f_p до $3,5 f_p$ (f_p – середня частота смуги пропускання фільтра). Зазначимо, що характеристики такого фільтра (щодо зниження рівня паразитних смуг пропускання) можна суттєво покращити, якщо використати більш складну конструкцію ФНЧ, якій притаманні полюси згасання у смузі загородження.

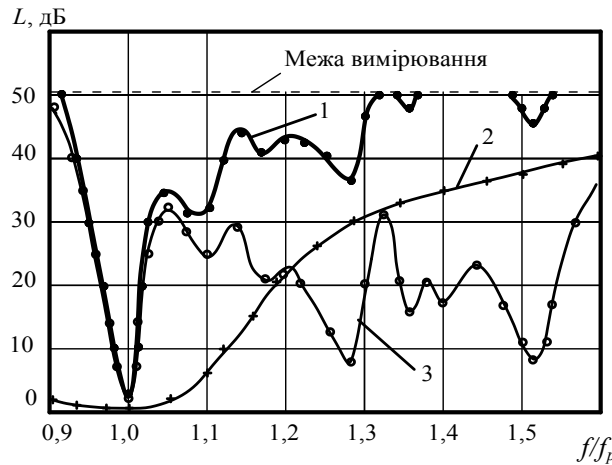


Рис. 1. АЧХ комбінованого фільтра (1) та його складових – ФНЧ (2) і фільтра на ДР (3)

Комбінований смугово-пропускний фільтр, виконаний на основі каскадного з'єднання смугово-пропускних фільтрів, виконаних на основі мікросмужкових та діелектричних резонаторів.

У комбінованому смугово-пропускному фільтрі, що являє собою каскадне включення СПФ, виконаних на основі мікросмужкових та діелектричних резонаторів, АЧХ в околі резонансної частоти формується ДР. При збільшенні відстроювання від резонансної частоти на характеристику фільтра все більше впливає мікросмужковий фільтр, причому резонансна частота та смуга пропускання останнього мають бути вибрані так, щоб вносити мінімальні спотворення навколо резонансної частоти фільтра на ДР. Слід враховувати, що добротність мікросмужкових резонаторів приблизно на порядок нижча за добротність ДР. Тому для мінімізації втрат, що вносяться у тракт комбінованим СПФ, доцільно проектувати мікросмужковий фільтр з максимальною можливою при заданій технології виготовлення смугою пропускання. При цьому резонансні втрати мікросмужкового фільтра в перерахунку на один резонатор складатимуть 0,15–0,2 дБ та менше. При проектуванні такого фільтра слід вибирати прототип з малим рівнем пульсацій (нерівномірності) у смугі пропускання [2].

На рисунку 2 наведена АЧХ (крива 1) комбінованого фільтра, побудованого на базі каскадного з'єднання двох смугово-пропускних фільтрів, один з яких виконаний на мікросмужкових, а другий – на діелектричних резонаторах.

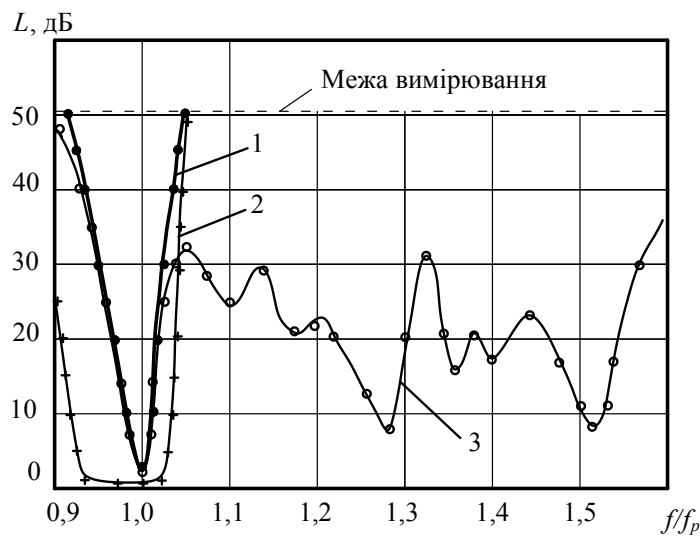


Рис. 2. АЧХ комбінованого фільтра (1) та його складових – смугово-пропускних фільтрів на мікросмужкових (2) і діелектричних (3) резонаторах

Фільтр виготовлено на керамічній підкладці ($\epsilon = 9,8$), він містить 9-резонаторний мікросмужковий

фільтр на зустрічних стрижнях (АЧХ цього фільтра представлена на рисунку 1 кривою 2) та фільтр на двох дискових ДР ($\epsilon = 85$), розміщених біля розімкнених кінців відрізків мікросмужкових ліній (АЧХ цього фільтра представлена на рисунку 1 кривою 3). Під час розрахунків смуга пропускання мікросмужкового фільтра була прийнята рівною 12 %, що відповідає втратам 0,15 дБ на один резонатор.

Вибрані параметри складових фільтрів дозволили реалізувати комбінований фільтр зі смугою пропускання близько 3 %, втратами у смузі пропускання 2,5 дБ.

Паразитні смуги пропускання комбінованого фільтра досліджувалися в діапазоні частот від f_p до $2,8 f_p$. Встановлено, що резонансні втрати в паразитних смугах пропускання (що спостерігалися у вказаному діапазоні частот) перевершували більше ніж на 50 дБ резонансні втрати в робочій смузі пропускання комбінованого фільтра.

Комбінований смугово-пропускний фільтр, виконаний на основі каскадного з'єднання мікросмужкового смугово-пропускного фільтра та смугово-загороджувального фільтра на основі діелектричних резонаторів.

У комбінованому смугово-пропускному фільтрі, що виконаний на основі каскадного з'єднання мікросмужкового СПФ та смугово-загороджувального фільтра на ДР, смуга пропускання формується переважно за допомогою мікросмужкових резонаторів. При цьому смугово-загороджувальний фільтр на діелектричних резонаторах призначений для звужування робочої смуги пропускання комбінованого фільтра та збільшення втрат у паразитних смугах пропускання.

На рисунку 3 наведена АЧХ (крива 1) комбінованого фільтра, побудованого у вигляді каскадного з'єднання смугово-пропускного фільтра на мікросмужкових резонаторах та смугово-загороджувального фільтра на ДР.

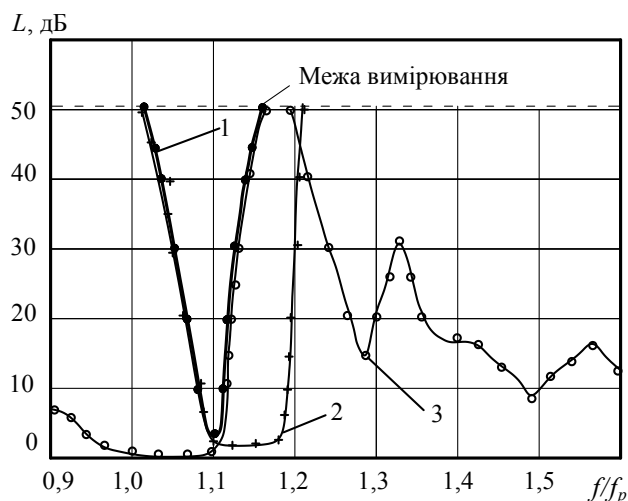


Рис. 3. АЧХ комбінованого фільтра (1) та його складових – смугово-пропускного мікросмужкового (2) і смугово-загороджувального діелектричного (3) фільтрів

Комбінований СПФ даного типу був виготовлений на керамічній підкладці ($\epsilon = 9,8$) і містив мікросмужковий СПФ на основі 9-елементної зустрічнострижневої структури та 3 дискові ДР ($\epsilon = 85$), розміщені ланцюгом у безпосередній близькості від центрального провідника мікросмужкової лінії. На рисунку 3 наведені АЧХ комбінованого СПФ (крива 1) та його складових (криві 2 і 3 – відповідно для мікросмужкового смугово-пропускного та діелектричного смугово-загороджувального фільтрів).

Реалізований комбінований СПФ забезпечував резонансні втрати 2,6 дБ при смузі пропускання 4 % та втрати в паразитних смугах пропускання завбільшки 50 дБ у смузі частот від f_p до $2,8 f_p$.

Висновки. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що під час проектування смугово-пропускних фільтрів для ГІС доцільно використовувати каскадне включення фільтрів, один з яких виконаний на діелектричних, а другий – на мікросмужкових резонаторах. При цьому слід зауважити, що за умови лінійного тракту складові комбінованого фільтра можуть розміщуватися не поруч, а розділятися іншими (лінійними) елементами.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ільченко М.Ю. Електродинаміка діелектричних резонаторів / М.Ю. Ільченко, О.О. Трубін. – К. : Наукова думка, 2004. – 266 с.
2. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование : пер. с англ. – М. : Радио и

связь, 1990. – 288 с.

МІРСЬКИХ Георгій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіоприймання та оброблення сигналів Національного технічного університету України "КПІ".

Наукові інтереси:

– пристрої мікрохвильової техніки.

РИБІН Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, декан радіотехнічного факультету, завідувач кафедри радіоприймання та оброблення сигналів Національного технічного університету України "КПІ".

Наукові інтереси:

– методи оброблення сигналів;

– пристрої мікрохвильової техніки.

Подано 20.07.2010

Мірських Г.О., Рибін О.І. Мікрохвильові смугово-пропускні фільтри гібридних інтегральних схем на діелектричних резонаторах

Мирских Г.А., Рыбин А.И. Микроволновые полосно-пропускные фильтры гибридных интегральных схем на диэлектрических резонаторах

Мірських Г.О., Рибін О.І. Мікрохвильові смугово-пропускні фільтри гібридних інтегральних схем на діелектричних резонаторах

УДК 621.372.413

Микроволновые полосно-пропускные фильтры гибридных интегральных схем на диэлектрических резонаторах / Г.А. Мирских, А.И. Рыбин

В работе рассмотрены принципы строения микроволновых полосно-пропускных фильтров на основе микрополосных линий передачи с открытыми диэлектрическими резонаторами. Предложены принципы построения таких фильтров, которые дают возможность существенно снизить уровень передачи энергии в паразитных полосах, которые свойственны фильтрам на диэлектрических резонаторах. Приведены результаты экспериментальных исследований

УДК 621.372.413

АНГЛИЙСКИЙ