

# Конструкція зустрічно-стрижневого фільтра кільцевої форми з підвищеною частотною вибірковістю

Карташев В. В.<sup>1</sup>, Старунський А. В.<sup>2</sup>, Живков О. П.<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> НДІ «Квант», Україна

<sup>2</sup> ДП «Укрметртестстандарт», Україна

<sup>3</sup> НТУ України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Україна

E-mail: [avstar1949@gmail.com](mailto:avstar1949@gmail.com)

## Анотація

Запропоновано конструкцію зустрічно-стрижневого смуго-пропускного фільтра кільцевої форми з підвищеною частотною вибірковістю за рахунок зближення ліній входу і виходу і введення додаткових ліній між ними. Це дозволяє формувати амплітудно-частотну характеристику такого фільтра з полюсами загасання на краях його смуги пропускання, що значно збільшує крутизну її спадів. Виготовлено макет такого чотирирезонаторного зустрічно-стрижневого смуго-пропускного фільтра і наведено результати його експериментальних досліджень. Вони показали, що розроблений фільтр може успішно використовуватись у вимірjувальних каналах з визначення частоти сигналів в сучасній НВЧ апаратурі зв'язку, радіолокації і телекомунікації.

**Ключові слова:** смуго-пропускний фільтр, симетрична повітряно-смуужкова лінія, зустрічні стрижні, кільцева форма, додаткові стрижні, частотна вибірковість, полюси загасання, експериментальні дослідження, вимірювання, НВЧ апаратура.

Опубліковано

20.11.22



## 1. Вступ

Радіoeлектронні системи та пристрої широко застосовуються як в побуті, так і в техніці спеціального призначення. Поліпшення експлуатаційних характеристик сучасної апаратури зв'язку, радіолокації і телекомунікації таких як завадостійкість, дальність і точність дії, стабільність і надійність в роботі в значній мірі залежить від параметрів використовуваних смуго-пропускних радіочастотних фільтрів. Такі фільтри повинні мати високу частотну вибірковість, малі внесені затрати і можливість обробки сигналів з високою

вхідною потужністю<sup>[1, 2]</sup>. У вимірjувальних каналах з визначення частоти сигналів в НВЧ апаратурі широке застосування знаходять смуго-пропускні фільтри на зустрічних стрижнях, які мають ряд відомих переваг<sup>[3, 4]</sup>. В основному використовуються зустрічно-стрижневі фільтри типової конструкції, що мають прямокутний переріз і виконані на симетричній повітряно-смуужковій лінії з прямокутними внутрішніми провідниками. Такі фільтри мають обмежену частотну вибірковість. Поліпшити частотну вибірковість можна шляхом збільшення числа резонаторів в фільтрах. Однак, по-перше, це неминуче призводить до ускладнення

конструкції фільтра та його налаштування, а, по-друге, фільтр має кінцеві значення коефіцієнта прямокутності, що залежить від числа резонаторів і добутку їх власної добротності на відносну смугу пропускання фільтра. Зменшити ці кінцеві значення коефіцієнта прямокутності фільтра шляхом збільшення числа резонаторів вже неможливо [5]. Тому становлять інтерес фільтри, в яких підвищення частотної вибіркової досягається не тільки збільшенням числа резонаторів, а й введенням додаткових реактивних зв'язків: паралельних між несусідніми резонаторами [6,7], безпосередньо між вхідною і вихідною лініями передачі [8,9].

## 2. Актуальність та мета публікації

У типових конструкціях зустрічно-стрижневих НВЧ фільтрів лінії входу-виходу віддалені на значну відстань, яка збільшується з ростом числа резонаторів. Це не дозволяє істотно підвищити їх частотну вибірку, тому що організувати додаткові реактивні зв'язки, і перш за все, між вхідною і вихідною лініями не представляється можливим. Цей недолік усунуто в конструкції смуго-пропускного зустрічно-стрижневого фільтра кільцевої форми [10], що дозволяє збільшити частотну вибірку за рахунок зближення ліній входу і виходу і введення додаткових ліній між ними.

У даній роботі наводяться результати розробки в S-діпазоні зустрічно-стрижневого смуго-пропускного фільтра кільцевої форми з підвищеною частотною вибіркою.

## 3. Основна частина

Спрощена конструкція розробленого чотирьорезонаторного зустрічно-стрижневого фільтра представлена на Рис. 1, а на Рис. 2 – його схематичне зображення. Корпус фільтра виконаний у вигляді двох аналогічних кільцевих жолобів 1 з Ш-образним поперечним перерізом, які з'єднуються встик по краях, протилежним основам жолобів. У середині кожного жолоба на основі аналогічним чином розташована гребінчаста структура

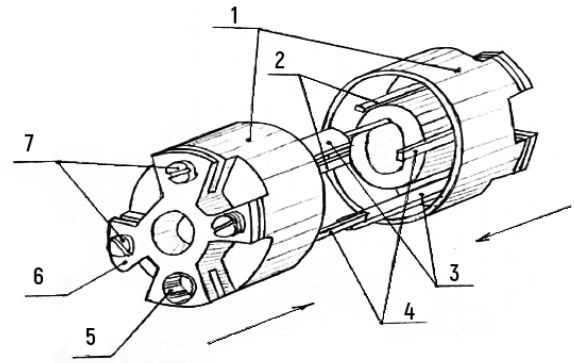


Рис. 1. НВЧ фільтр на зустрічних стрижнях з підвищеною частотною вибіркою.

- 1 – кільцеві жолоби;
- 2 – смужкові резонатори;
- 3 – лінії входу-виходу;
- 4 – додаткові смужкові лінії;
- 5 – НВЧ розніми;
- 6 – багатопелюсткові припливи;
- 7 – настроювальні гвинти

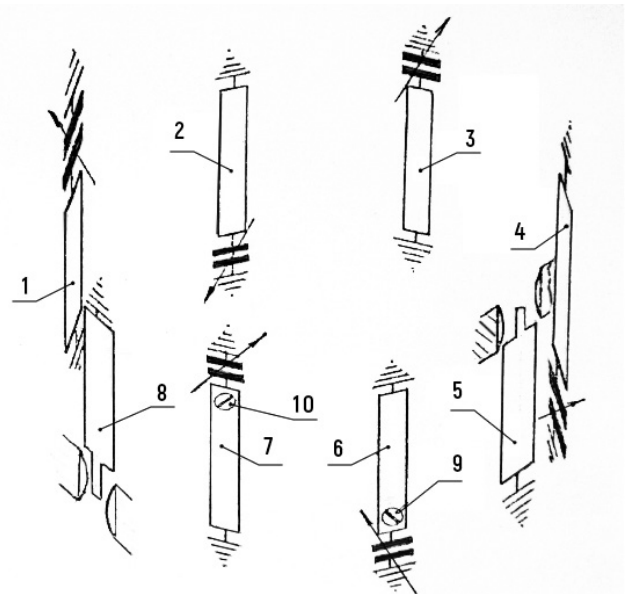


Рис. 2. Схематичне зображення чотирьорезонаторного зустрічно-стрижневого фільтра кільцевої форми.

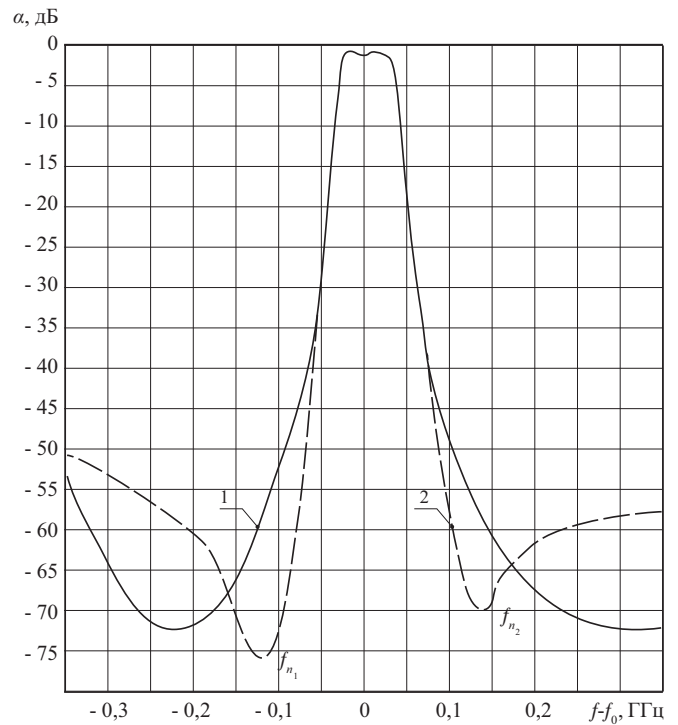
- 1-4 – смужкові резонатори;
- 6, 7 – додаткові смужкові лінії;
- 5, 8 – вхідна або вихідна лінія;
- 9, 10 – настроювальні гвинти

смужкових резонаторів 2, вхідна або вихідна лінія 3, НВЧ розніми 5, настроювальні гвинти 7 і елементи кріплення, а в малому секторі між вхідною і вихідною лініями 3 і рознімами 5 розташовані додаткові смужкові лінії 4, які забезпечені настроювальним гвинтом 7. Торць кільцевого жолоба

забезпечений багатопелюстковим припливом 6 у вигляді мальтійського хреста, в центрі якого виконано наскрізний отвір. На кожній пелюстці посередині жолоба виконано різьбовий деформований отвір, в якому пружно встановлений настроювальний гвинт, або наскрізний циліндричний отвір, в якому розміщена пружинна скоба, що охоплює поперечну проточку контактів НВЧ розніму 5.

Розроблений смуго-пропускний НВЧ фільтр відноситься до фільтрів з безпосередніми зв'язками і працює наступним чином. На погоджувальний (нерезонансний) стрижень на вході (виході) фільтра подається (знімається) сигнал НВЧ. Смужкові чвертьхвильові резонатори (стрижні), в яких чергуються площини короткого замикання, працюють на хвилі типу TEM.

Основний зв'язок здійснюється за допомогою крайових полів між сусідніми резонаторами (досвід показав, що допущення про повну відсутність зв'язку між несусідніми резонаторами цілком допустимо для практичних застосувань). Хоча лінії входу і виходу розташовані поруч, але за відсутності додаткових стрижнів безпосередній зв'язок між двома погоджувальними стрижнями згідно<sup>[1]</sup> виключається, бо мінімальна відстань, на яку рознесені останні, в 2-3 рази більше відстані між стінками жолобів. У цьому випадку фільтр на основі послідовно зв'язаних резонансних структур (без додаткових стрижнів) має амплітудно-частотну характеристику з монотонною зміною загасання (крива 1 на Рис. 3). Введення додаткових смужкових ліній (стрижнів) з настроювальними гвинтами дозволяє отримати ще слабкий додатковий реактивний зв'язок між погоджувальними стрижнями. Сигнал на виході фільтра в цьому випадку представляє собою вже суму сигналів, переданих основним та додатковим зв'язками. Два полюса загасання, отримані на деяких частотах по обидві сторони від смуги пропускання, це результат того, що сумарний вихідний сигнал на них виявляється близьким до нуля (крива 2 на Рис. 3). Загасання сигналу на частотах полюсів  $f_{n_1}$  і  $f_{n_2}$  залежить від величини додаткового зв'язку, а положення полю-



**Рис. 3.** Амплітудно-частотні характеристики фільтра:

крива 1 – без додаткових стрижнів;

крива 2 – з додатковими стрижнями

сів ще і від смуги пропускання фільтра. Змінюючи величину додаткового зв'язку за допомогою настроювальних гвинтів, можна регулювати положення полюсів відносно центральної частоти фільтра  $f_0$ .

#### 4. Експериментальні результати

Виготовлений і експериментально досліджений макет такого чотирирезонаторного смуго-пропускного зустрічно-стрижневого фільтра. У фільтрі встановлено гіперболоїдні розніми<sup>[12]</sup>. Фільтр має наступні параметри: смуга пропускання на рівні 3 дБ дорівнює  $\Delta f \approx 60$  МГц; внесені загрози  $\alpha_0$  складають не більше 1,5 дБ; діапазон робочих частот, в якому можливе перестроювання АЧХ фільтра становить близько 350 МГц; загасання сигналу  $\alpha_s$  при відстроюванні від центральної частоти фільтра  $f_0$  на  $\pm 60$  МГц становить 35 дБ; розв'язка – не менше 50 дБ; КСХН  $\leq 1,7$ ; об'єм  $v \approx 34$  см<sup>3</sup>; маса  $m \approx 170$  г.

Слід зауважити, що організація додаткового реактивного зв'язку між лініями входу-виходу,

підвищуючи локальну вибірковість, призводить до незначного погіршення розв'язки фільтра (див. Рис. 3).

Визначимо показники якості ПЯ розробленого фільтра, застосовуючи відомий критерій якості для смуго-пропускних фільтрів будь-якого типу, який приведено в [13]. Вираз для ПЯ має наступний вид:

$$\text{ПЯ} = \frac{10}{\lambda} \left[ \frac{\alpha_0 (\Delta f / f_0) v}{(\alpha_3 / 20)^2} \left( \log \frac{\Delta f_3}{\Delta f} \right)^2 \right], \quad (1)$$

де

$\alpha_0$ , дБ – рівень мінімальних внесених затрат в смугі пропускання;

$\Delta f$  – ширина смуги пропускання на рівні 3 дБ;

$\Delta f_3$  – ширина смуги на рівні загасання  $\alpha_3$ ;

$\Delta f / f_0$  – відносна ширина смуги пропускання, %;

$\Delta f_3 / \Delta f$  – коефіцієнт прямокутності ( $K_{np}$ );

$v$ , см<sup>3</sup> – фізичний об'єм фільтра;

$\lambda$ , см – робоча довжина хвилі.

Теоретичні і експериментальні дослідження багатьох фільтрів на відрізках ліній передачі різних типів показали, що для канонічних фільтрів ПЯ = 3,0–3,5 при якісному їх виготовленні. В [10] було встановлено, що аналогічний фільтр кільцевої форми, але без додаткових смужкових ліній між входом і виходом, має показник якості 3,5. Для розробленого фільтра, із виразу (1) при підстановці приведених вище параметрів, отримано наступні показники якості: ПЯ<sub>1</sub> = 3,14 для  $K_{np1} = 1,83$  на рівні  $\alpha_3 = 30$  дБ; ПЯ<sub>2</sub> = 2,88 для  $K_{np2} = 2,17$  на рівні  $\alpha_3 = 40$  дБ; ПЯ<sub>3</sub> = 2,58 для  $K_{np3} = 2,50$  на рівні  $\alpha_3 = 50$  дБ. Усереднений показник якості дорівнює ПЯ = 2,87.

Визначення параметрів фільтра проведено за допомогою вимірювача комплексного коефіцієнта передачі P4-38, який для приладів своєї групи має

покращену точність вимірювань за рахунок використання мікропроцесорної техніки. Це дозволяє в його діапазоні вимірювання модуля коефіцієнта передачі (0 ... – 80) дБ отримати прийнятні невизначеності вимірювання загасання фільтра. Так, стандартна невизначеність не перевищує  $\pm 1,1$  дБ (з урахуванням того, що, як правило, проводяться одноразові вимірювання, границі похибки яких визначені при повірці або вказані в метрологічній документації на прилад [14]). Розширена невизначеність вимірювання загасання фільтра при рівні довіри 0,95 і коефіцієнті охопту  $k = 2$  (з урахуванням допущення про нормальність закону розподілу результату вимірювання) не перевищує  $\pm 2,2$  дБ.

## 5. Висновки

1. Розроблено конструкцію зустрічно-стрижневого смуго-пропускного фільтра кільцевої форми з підвищеною частотною вибірковістю за рахунок зближення ліній входу і виходу і введення додаткових ліній між ними.

2. Представлені результати експериментальних досліджень розробленого фільтра, які установили наявність двох полюсів затухання на його амплітудно-частотній характеристиці, що дозволяє значно збільшити крутизну її спадів.

3. Визначено, що введення додаткових смужкових ліній між входом і виходом зустрічно-стрижневого смуго-пропускного фільтра кільцевої форми покращило його показник якості з 3,5 до 2,87.

4. Розроблений фільтр може знайти застосування у вимірювальних каналах з визначення частоти сигналів в сучасній НВЧ апаратурі зв'язку, радіолокації і телекомунікації, бо за своїми електричними і конструктивно-технологічними показниками перевершує відомі типи зустрічно-стрижневих смуго-пропускних фільтрів.

## Посилання

1. Бойко Ю. П., Приходько Т. Ю., Басюк І. О. 2018 Огляд сучасних фільтруючих пристроїв НВЧ і їх методів побудови. Науковий журнал «Мікроелектроніка». № 3 (39), сс. 338-344.
2. Лутчак О. В. 2016 Моделювання смуго-пропускного фільтра для забезпечення електромагнітної сумісності базових станцій систем зв'язку у суміжних смугах частот. Цифрові технології. № 20, сс. 72-75.
3. Леонченко В. П., Фельдштейн А. Л., Шепелянский Л. А. 1975 Расчет полосковых фильтров на встречных стержнях: Справочник. М. Связь, с. 312.
4. Мастей Г. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. 1979 Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Пер. с англ. под ред. Л.В. Алексеева и Ф.В. Кушнира. М. Связь. Т. 2, с. 495.
5. 1970 Справочник по элементам полосковой техники. Под ред. Ф.Л. Фельдштейна. М. Связь, с. 336.
6. Бергер М. Н. 1985 Фильтры СВЧ с дополнительными параллельными связями. Зарубежная радиоэлектроника. № 6, сс. 34-51.
7. Мисевич В. И., Ольшанский Л. М., Старунский А. В., Шеламов Г. Н. 15.02.1991 Сверхвысоко частотный фильтр. А.с. 1628109 СССР. Бюлетень № 6.
8. Roschmann P. 1973 Compact YIG bandpass filter with finite-pole frequencies for application in microwave integrated circuits. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. MTT-21, pp. 52-57.
9. Ильченко М. Е., Мелков Г. А., Мирских Г. А. 1977 Твердотельные СВЧ фильтры. Киев. Техніка, с. 120.
10. Карташев В. В., Старунський А. В. 2022 Зустрічно-стрижневий фільтр кільцевої форми. Інфраструктура вимірювань, № 3.
11. Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П. 1967 Справочник по элементам волноводной техники. М. Сов. Радио, с. 651.
12. Карташев В. В. 15.12.1985 Гиперболоидное гнездо СВЧ-разъема. А.с. 1125684 СССР. Бюлетень № 46.
13. Бачинина Е. Л. 1990 Критерий качества полосно-пропускающих фильтров. Радиотехника и электроника. Т 35, № 11, сс. 2449-2452.
14. Захаров И. П., Кукуш В. Д. 2002 Теория неопределенности в измерениях. Харьков. Консум, с. 256.