УДК 621.372.852.001.11

В.М. Крищук, О.Ю. Фарафонов, С.М. Романенко, В.Ф. Онищенко, Г.М. Шило
Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя

ВРАХУВАННЯ ДОПУСКІВ І ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОСМУЖКОВИХ СМУГОВИХ ФІЛЬТРІВ НА ЗВ'ЯЗАНИХ ЛІНІЯХ

© *Крищук В. М., Фарафонов О. Ю., Романенко С. М., Онищенко В. Ф., Шило Г. М., 2005*

Досліджено вплив допусків на параметри мікросмужкових смугових фільтрів на зв'язаних лініях з бічним зв'язком і їхній синтез за заданим відхиленням амплітудно-частотної характеристики. Використано стандартний метод синтезу на основі фільтрів-прототипів нижніх частот із зосередженими параметрами. Номінальні геометричні розміри фільтра визначені за допомогою ітераційної процедури аналізу зв'язаних ліній у квазістатичному наближенні. Товщина металізації враховується в розрахунках зміною ефективної ширини смужок.

Розрахунок і оптимізація допусків на геометричні розміри фільтра виконують з використанням інтервальних моделей і вагових коефіцієнтів. Виконано синтез і аналіз допусків геометричних розмірів класичної топології фільтра на напівхвильових резонаторах. Синтезовано топологію фільтра на меандрових лініях. Показано, що врахування особливостей технології виготовлення фільтра дає змогу збільшити допуск на розмір найменшого елемента конструкції майже вдвічі.

Proceed from the deviation of the frequency characteristics, the influence of tolerances on geometrical parameters of the coupled-line microstrip bandpass filters with side-by-side coupling and subsequent filters synthesis are investigated. The method of synthesis is based on the use of the lower frequency filters-prototypes with lumped elements. The nominal dimensions of the coupled lines are specified by means of the quasi-static analysis iterative procedure. The thickness of metallization is taken into account by use of the effective strip width variation.

Calculation and optimization of tolerances for the geometrical sizes of the filter is accomplished by use of an interval models and weight coefficients. Synthesis and analysis of tolerances of the geometrical sizes of the classic half-wave resonators filter topology is carried out. The filter topology on meander lines (hairpin-line filter) is synthesized. It is shown that taking into account the technology of the filter manufacturing allows increasing the tolerance on the least element of topology almost two times.

Бурхливий розвиток і вдосконалення систем радіолокації, автоматизованих систем зв'язку і попередження, систем телекомунікації вимагають постійного поліпшення параметрів НВЧ-пристроїв і скорочення термінів їхнього проектування. Це повною мірою стосується і пасивних елементів хвилевідних структур, побудованих на лініях з розподіленими параметрами і, зокрема, на мікросмужкових лініях.

Проектування НВЧ-пристроїв на мікросмужкових лініях складається з чотирьох основних етапів:

– синтез пристрою;

– розрахунок геометричних параметрів пристрою;

– виготовлення дослідного зразка і виконання вимірів;

– зміна геометрії пристрою на основі цих вимірів.

Ідеальним рішенням при створенні НВЧ-пристроїв було б максимальне скорочення часу проектування і виключення етапів вимірювання і підстроювання. Однак цей підхід не дає змоги одержати пристрої з прийнятними характеристиками. Це зв'язано з неточністю математичних моделей синтезу і, головне, з погрішністю математичних моделей визначення геометричних параметрів пристрою. При використанні найточніших методів синтезу і визначення геометричних

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

параметрів пристрою на передній план виходить проблема забезпечення точності виготовлення, що прямо зв'язана з технологією виготовлення пристрою. Отже, виникає задача визначення впливу відхилення фізичних параметрів матеріалів і розмірів конструкції на вихідні характеристики або, що характерніше, визначення припустимих відхилень параметрів конструкції за заданої нестабільності вихідних характеристик.

Проблеми визначення допусків при виготовленні пристроїв НВЧ стосується значна кількість публікацій (наприклад [1,2]). При проектуванні мікросмужкових НВЧ-фільтрів найактуальніші задачі точного визначення геометричних розмірів синтезованої конструкції і визначення допусків на параметри конструкції залежно від вимог до вихідних характеристик. Як правило, мікросмужкові фільтри виробляються в умовах дрібносерійного виробництва, тому особливо важливим є визначення гарантованих допусків. Інтервальні моделі, що використані для визначення гарантованих допусків, накладають певні обмеження на вид вихідної функції і, водночас, прості у використанні і мають достатню точність [3,4].

Метою роботи є дослідження впливу допусків на параметри мікросмужкових смугопропускних фільтрів (СПФ).

Проектування фільтрів на зв'язаних лініях. Під час проектування СПФ необхідно визначити:

– на етапі синтезу – вид і кількість ланок фільтра n, параметри елементів заступної схеми фільтра g_i і хвильові опори парної Z_{oe} і непарної Z_{oo} мод для кожної ланки фільтра;

– на етапі розрахунку розмірів топології фільтра, ширини зв'язаних ліній фільтра W_i, зазори між ними S_i і довжини ланок фільтра l_i (рис. 1).

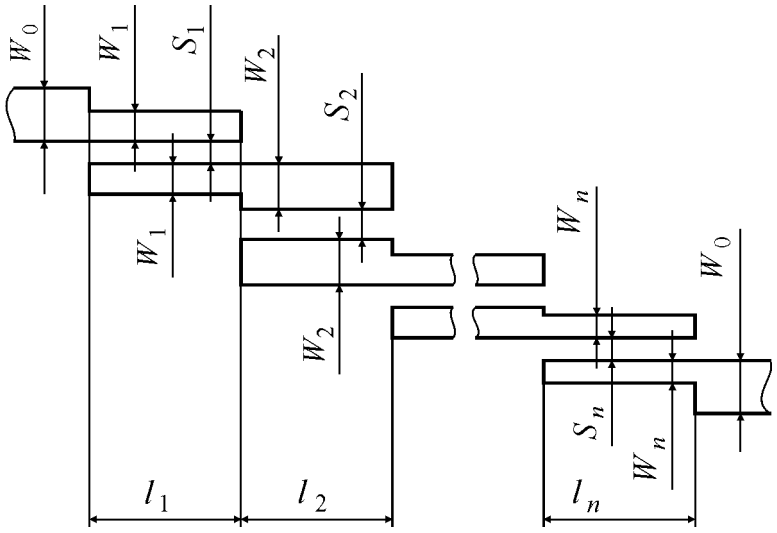

Рис. 1 Ескіз струмонесучої частини мікросмужкового СПФ на однаково зв'язаних лініях

Одним з найпоширеніших і найточніших методів синтезу при проектуванні мікросмужкових СПФ є синтез з використанням фільтрів-прототипів нижніх частот [5,6]. Найпослідовніше, стосовно до розглянутого виду фільтрів, методика синтезу викладена в [7].

Хвильові опори ланок фільтра на зв'язаних лініях для парного і непарного видів збудження мають вигляд [5]:

$$Z_{\frac{oe}{oo}i} = Z \cdot \left[1 \pm \frac{Z}{k_{i-1,i}} + \left(\frac{Z}{k_{i-1,i}} \right)^2 \right], \tag{1}$$

$$k_{i-1,i} = \frac{Z}{\frac{\pi}{\omega_n'} \cdot \left(\frac{f_{c+} - f_{c-}}{f_{c+} + f_{c-}} \right) \cdot \sqrt{\frac{1}{g_{i-1} \cdot g_i}}},$$

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

де Z – хвильовий опір підвідних ліній передачі; $\omega_{\text{п}}^{'}$ – приведена гранична частота фільтра нижніх частот; f_{c+} , f_{c-} – граничні частоти, визначені за рівнем робочого загасання, для верхньої і нижньої границь смуги пропускання фільтра; $i = 1..n+1$ – кількість ланок фільтра на зв'язаних лініях.

Різні методики наближеного визначення розмірів зв'язаних мікросмужкових ліній досліджувались в [7], де показано, що найточнішими на етапі попереднього визначення розмірів зв'язаних ліній є залежності, описані в [8], а алгоритм розрахунку, використаний у [9], найпростіший для практичного використання і значно скорочує час обчислень. Тому для розрахунку попередніх розмірів зв'язаних ліній використовують алгоритм розрахунку [9] і залежності, отримані в [8]. Для подальшого уточнення розмірів зв'язаних ліній застосовують методику квазістатичного аналізу однаково зв'язаних мікросмужкових ліній [10]. Для одержання геометричних розмірів ліній у програму введений ітераційний алгоритм, за допомогою якого за заданими хвильовими опорами зв'язаних ліній для парної і непарної мод визначають ширини ліній і зазори між ними.

Товщина струмонесучої смужки t враховується за наближеною методикою [9], у якій визначається ефективна ширина $W_{эф}$ і зазор $S_{эф}$ зв'язаних ліній:

$$W_{эф_i} = W_i + \Delta W_i, \quad S_{эф_i} = S_i - \Delta W_i, \quad \Delta W_i = \frac{t}{\pi \cdot h} \cdot \ln \frac{10{,}873}{\sqrt{\left(\frac{t}{h}\right)^2 + \left(\pi \cdot \left(\frac{W}{t} + 1{,}1\right)\right)^{-2}}}, \quad (2)$$

де h – товщина підкладки.

Ширину струмонесучого провідника підвідних мікросмужкових ліній W_0 визначають за заданим хвильовим опором ліній Z_0 [11,12] і уточнюють з використанням методики [10].

Довжини ланок фільтра визначають зі співвідношення [5]:

$$l_i = \frac{\lambda_0}{4 \cdot \sqrt{\varepsilon_{эф_i}}}, \quad (3)$$

де λ_0 – довжина хвилі у вільному просторі, що відповідає центральній частоті смуги пропускання фільтра; $\varepsilon_{эф_i}$ – ефективна діелектрична проникність матеріалу підкладки для ланки фільтра.

Значення $\varepsilon_{эф_i}$ визначають за наближеною формулою для одиничної мікросмужкової лінії [13]:

$$\varepsilon_{эф_i} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \left(1 + \frac{10 \cdot h}{W_i}\right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

де ε_r – відносна діелектрична проникність матеріалу підкладки; h – товщина діелектричної підкладки.

Враховують крайову ємність зв'язаних ліній, змінюючи довжину області зв'язку, крайову ємність розраховують за формулою [14]:

$$C_{K\,i} = \exp\left[(\ln 10) \cdot \sum_{k=1}^{5} c_k \cdot \left(\log \frac{W_i}{h}\right)^{k-1}\right], \quad (5)$$

де c_k – коефіцієнти, що залежать від діелектричної проникності підкладки.

З урахуванням підвищених вимог до масогабаритних характеристик НВЧ пристроїв більше поширення одержала реалізація фільтрів на зв'язаних лініях у вигляді меандрових структур (шпильковий фільтр) (рис. 2).

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

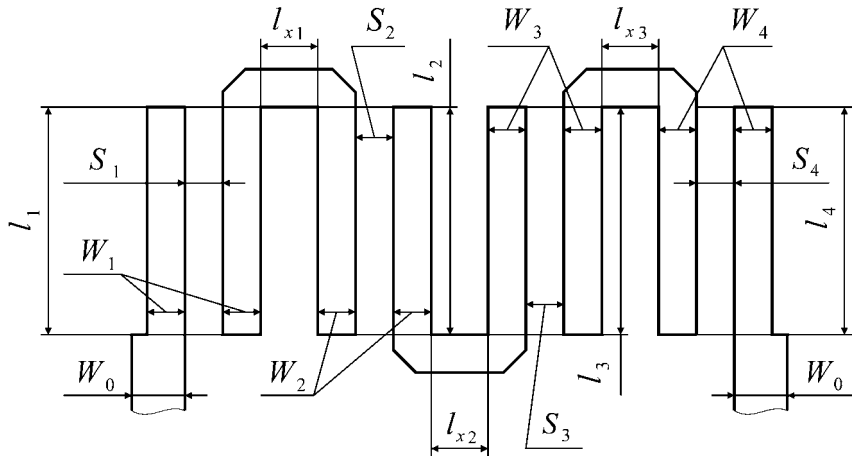

Рис. 2 Ескіз струмонесучої частини мікросмужкового СПФ на меандрових лініях

Для синтезу топології шпилькового фільтра звичайно використовують дані розрахунку класичної топології фільтра і надалі виконують оптимізацію конструкції.

Дослідження допусків елементів конструкції. Основною характеристикою фільтра є залежність загасання від частоти. Для СПФ на зв'язаних лініях ланки фільтрів можуть бути подані у виді чотириполюсників, а частотна характеристика може бути отримана перемножуванням класичних матриць передачі окремих ланок. Функція внесеного загасання для фільтра описується виразом [1]:

$$a(f) = 20 \cdot \log \frac{1}{2} \cdot \left(A_{11} + \frac{A_{12}}{Z} + A_{21} \cdot Z + A_{22} \right), \qquad (6)$$

де $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$ – коефіцієнти результуючої матриці передачі фільтра.

Безпосередньо використати вираз (6) для синтезу допусків доволі важко, тому застосовують інтервальні моделі, що враховують нелінійну залежність загасання фільтра від параметрів конструкції і взаємну компенсацію відхилень, а також мають достатню точність [3,4]. Синтез допусків здійснюється на верхній межі смуги пропускання фільтра.

Для створення спрощених лінійних інтервальних моделей використовують внутрішню і зовнішню інтерполяцію [3]. Зовнішня інтерполяція дає змогу одержати точні значення вихідної характеристики на межах допусків вхідних параметрів, однак накладає додаткові обмеження на функцію. Функція повинна бути гладкою і не мати точок, у яких часткові похідні дорівнюють 0. Внутрішня інтерполяція описується виразом:

$$\mathbf{y}_r = \mathbf{a}_{r0} + \sum_{\substack{i=1 \\ a_{ri}>0}}^{n} \underline{\underline{\mathbf{a}}}_{ri}\, \mathbf{x}_i + \sum_{\substack{i=1 \\ a_{ri}<0}}^{n} \mathrm{dual}\left(\underline{\underline{\mathbf{a}}}_{ri}\, \mathbf{x}_i \right), \qquad (7)$$

де i – кількість параметрів; $\underline{\underline{\mathbf{a}}}_{ri} = \left[\underline{a}_{ri}; \bar{a}_{ri} \right]$ – комутаційні інтервальні коефіцієнти; $\mathbf{x}_i = \left[\underset{\sim}{x}_i; \tilde{x}_i \right]$ – інтервал зміни параметра x_i при розрахунку допусків; dual – оператор перетворення зворотних арифметичних операцій над інтервалами в прямі; a_{ri} – передатні коефіцієнти спрощеної функції при внутрішній інтерполяції; $\underset{\sim}{x}_i$ і $\tilde{x}_i$ – нижнє і верхнє значення i-го вхідного параметра в межах зміни x_i від номінального до межових значень інтервалу $\mathbf{x}_i$, для яких будують спрощену модель.

При використанні внутрішньої інтерполяції одна з точок визначається при номінальному значенні вихідної функції. Інші точки інтерполяції утворюються при призначенні одному з вхідних параметрів його межового значення зі збереженням номінальних значень для інших параметрів. Тоді передатні коефіцієнти визначаються співвідношеннями:

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

$$\underline{a}_{ri} = \frac{\underline{y}_i - y_н}{\underline{x}_i - x_{iн}}; \quad \overline{a}_{ri} = \frac{\overline{y}_i - y_н}{\overline{x}_i - x_{iн}}, \tag{8}$$

де $\underline{x}_i$ і $\overline{x}_i$ – нижня і верхня межі i-го вхідного параметра, для яких створюється спрощена модель; $\underline{y}_i$ і $\overline{y}_i$ – значення вихідної функції, коли i-й вхідний параметр має нижнє чи верхнє межове значення, а інші параметри – номінальне; $x_{iн}$ – номінальне значення параметра x_i; $y_н$ – номінальне значення вихідної функції.

Коефіцієнти $\underline{a}_{r0}$ і $\overline{a}_{r0}$ визначають за допомогою виразів:

$$\underline{a}_{r0} = y_н - \sum_{\substack{i=1 \\ \underline{a}_{ri}>0}}^{n} \underline{a}_{ri}\, x_{iн} + \sum_{\substack{i=1 \\ \overline{a}_{ri}<0}}^{n} \overline{a}_{ri}\, x_{iн}; \quad \overline{a}_{r0} = y_н - \sum_{\substack{i=1 \\ \overline{a}_{ri}>0}}^{n} \overline{a}_{ri}\, x_{iн} + \sum_{\substack{i=1 \\ \underline{a}_{ri}<0}}^{n} \underline{a}_{ri}\, x_{iн}. \tag{9}$$

У результаті внутрішньої інтерполяції утворюються дві гіперплощини $\underline{S}_r$ і $\overline{S}_r$, перша з яких використовується при інтерполяції поблизу нижніх меж вихідного параметра, а інша – верхніх.

Виконаємо дослідження допусків на прикладі мікросмужкового СПФ на однаково зв'язаних лініях (рис. 1). Фільтр має частотну характеристику максимально плоского типу і такі параметри:

– граничні частоти смуги пропускання фільтра f_{c-} = 945 МГц, f_{c+} = 1055 МГц за рівнем внесеного загасання $a_П$ =3 дБ;

– граничні частоти смуг загородження $f_{з-}$ = 800 МГц, $f_{з+}$ = 1200 МГц за рівнем загасання $a_З \geq$ 30 дБ;

– хвильовий опір підвідних ліній передачі Z_0 = 50 Ом;

Приведеним вихідним даним відповідає фільтр із чотирьох ланок зв'язаних мікросмужкових ліній (n = 4). Він виконується на підкладці з діелектричною проникністю ε_r = 9,6 і товщиною h = 1 мм. Номінальні розміри елементів фільтра, розраховані за наближеними методиками, і уточнені, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Номінальні розміри ділянок фільтра

Ланки фільтра	Хвильові опори, Ом	Розміри визначені за наближеними методиками, мм			Розміри уточнені, мм		
		W_i	S_i	l_i	W_i	S_i	l_i
Підвідні лінії	Z_0 =50	0,9207	–	–	0,9342	–	–
1, 4	Z_{oe} = 79,4383	0,5773	0,2851	29,8699	0,5831	0,321	29,4627
	Z_{oo} = 37,8541						
2, 3	Z_{oe} = 56,8614	0,901	1,0813	29,3358	0,8855	1,1824	29,0635
	Z_{oo} = 44,6338						

При введенні відхилень на параметри фільтра графік вихідної функції має осцилювальний характер. У зв'язку з цим модель будують тільки на основі внутрішньої інтерполяції. Вихідними даними для створення інтервальної моделі вихідної характеристики фільтра є розміри конструкції, визначені за наближеними методиками. Початкові відхилення конструктивних параметрів прийнято такими, що дорівнюють $\delta_i = \pm 2$ %. Відхилення внесеного загасання фільтра визначалося на верхній межі смуги пропускання фільтра f_{c+} = 1055 МГц. Для визначення значень коефіцієнтів інтервальної моделі і припустимих відхилень параметрів конструкції фільтра відхилення загасання фільтра було вибрано $\delta_a = \pm 5$ %. Застосування ітераційного алгоритму оптимізації допусків, при

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

незалежній зміні параметрів елементів, призводить до створення інтервальної моделі, з параметрами, що забезпечують максимальний об'єм допусків:

a = [-353,445;-357,584] + dual([-3,926;-3,831]W_1) + [8,834;9,324]W_2 + [8,834;9,324]W_3 + dual([-3,926;-3,831]W_4) + dual([-5,973;-5,955]S_1) + [7,982;8,086]S_2 + [7,982;8,086]S_3 + dual([-5,973;-5,955]S_4) + [0,667;0,685]l_1 + [3,552;3,556]l_2 + [3,552;3,556]l_3 + [0,667;0,685]l_4 + dual([-29,06;-24,04]h) + [12,487;12,692]ε_r.

де W_i=[$\underline{W_i}$;$\overline{W_i}$] – інтервальні параметри; dual[$\underline{W_i}$;$\overline{W_i}$]=[$\overline{W_i}$;$\underline{W_i}$]; $\underline{W_i}$ і $\overline{W_i}$ – нижня і верхня межі інтервалу.

Як видно з отриманої моделі, ширина (W_2, W_3) середніх ділянок зв'язаних ліній фільтра – найчутливіший до допусків елемент топології. Із загального комплексу розглянутих параметрів найчутливішою до допусків виявляється товщина підкладки h, тому що модель має найбільші передатні коефіцієнти (8) за цим параметром.

Оскільки виготовлення рисунка струмонесучого шару конструкції фільтра виконується в єдиному технологічному циклі, на певних етапах технології виготовлення видається доцільним синтезувати однакові за абсолютною величиною допуски, на всі елементи топології. Тому поле допуску вихідної функції загасання на кожен елемент топології призначалося залежно від вагових коефіцієнтів. Вагові коефіцієнти визначають на підставі нормування передатних коефіцієнтів моделі щодо передатного коефіцієнта найчутливішого до допусків елемента топології (W_2, W_3). Поле допуску вихідної функції на вплив відхилень товщини і діелектричної проникності підкладки залишалося незмінним. Уточняють розміри зв'язаних ліній фільтра і довжин областей зв'язку ланок фільтра з використанням алгоритмів [10,14].

Абсолютні відхилення параметрів конструкції фільтра від номінальних розмірів, визначених за наближеною методикою та уточнених, і їхнє процентне співвідношення при використанні вагових коефіцієнтів, і без них, наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Відхилення параметрів конструкції фільтра

Параметр	Наближений метод				Введення вагових коефіцієнтів					
					Наближений метод		Уточнений метод		Відсоткове співвідношення	
	Нижнє, мкм	Верхнє, мкм	Нижнє, %	Верхнє, %	Нижнє, мкм	Верхнє, мкм	Нижнє, мкм	Верхнє, мкм	Нижнє, %	Верхнє, %
W_1	2,78	2,85	0,481	0,493	2,07	2,12	2,09	2,15	0,359	0,368
W_2	1,23	1,17	0,137	0,130	2,19	2,07	2,15	2,04	0,243	0,230
W_3	1,23	1,17	0,137	0,130	2,19	2,07	2,15	2,04	0,243	0,230
W_4	2,78	2,85	0,481	0,493	2,07	2,12	2,09	2,15	0,359	0,368
S_1	1,83	1,83	0,640	0,642	2,07	2,08	2,33	2,34	0,727	0,730
S_2	1,37	1,35	0,126	0,125	2,10	2,07	2,30	2,27	0,194	0,192
S_3	1,37	1,35	0,126	0,125	2,10	2,07	2,30	2,27	0,194	0,192
S_4	1,83	1,83	0,640	0,642	2,07	2,08	2,33	2,34	0,727	0,730
l_1	16,09	15,93	0,054	0,053	2,09	2,07	2,07	2,05	0,007	0,007
l_2	3,07	3,07	0,010	0,010	2,08	2,07	2,06	2,05	0,007	0,007
l_3	3,07	3,07	0,010	0,010	2,08	2,07	2,06	2,05	0,007	0,007
l_4	16,09	15,93	0,054	0,053	2,09	2,07	2,07	2,05	0,007	0,007
h	0,38	0,45	0,038	0,045	0,38	0,45	0,38	0,45	0,038	0,045
ε_r, відн. од.	8,73 $\cdot 10^{-4}$	8,59 $\cdot 10^{-4}$	0,009	0,009	8,73 $\cdot 10^{-4}$	8,59 $\cdot 10^{-4}$	8,73 $\cdot 10^{-4}$	8,59 $\cdot 10^{-4}$	0,009	0,009

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Дані табл. 2 показують, що врахування особливостей технології виготовлення топології фільтра дає змогу збільшити допуск на розмір найменшого елемента конструкції майже вдвічі.

Оптимізація параметрів фільтра. З урахуванням отриманих допусків була здійснена оптимізація топології фільтра на меандрових лініях (рис. 2). Оптимізація топології здійснюється подовженням напівхвильових резонаторів і зміною довжин області зв'язку ($l_1 - l_4$). Коригують довжини симетрично щодо осі симетрії топології фільтра, що значно спрощує оптимізацію і скорочує кількість параметрів, що змінюються. Для зменшення взаємного впливу сусідніх областей зв'язку ланок фільтра довжини середніх ділянок приймають такими, що дорівнюють трьом товщинам підкладки. Коригують довжини області зв'язку ланок фільтра зміною довжини пліч сусідніх шпильок з обов'язковим збереженням довжини середньої ділянки. У аналізі фільтра не враховують погонні втрати і неоднорідності у вигляді зламу напівхвильових резонаторів і стрибків хвильових опорів між областями зв'язку.

Результати розрахунку частотних характеристик класичної топології фільтра на зв'язаних лініях і топології шпилькового фільтра з коригуванням довжин областей зв'язку наведено на рис. 3. Розрахунки виконані за допомогою пакета програм Microwave Office [7].

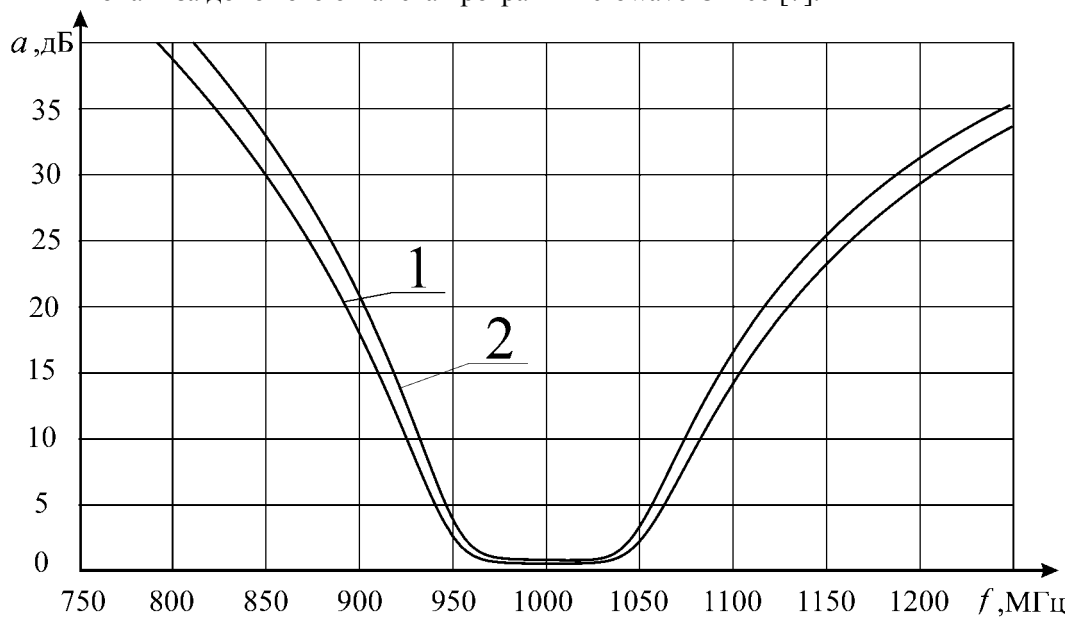

Рис. 3. Частотні характеристики фільтрів: 1 – фільтр на зв'язаних лініях; 2 – шпильковий фільтр

Результати коригування розмірів шпилькового фільтра і параметри фільтрів в області смуг пропускання і загородження, визначені за рівнем максимального загасання в смузі пропускання і за рівнем мінімального загасання в смузі загородження, наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Порівняльні дані аналізу топологій фільтрів

	Фільтр на зв'язаних лініях		Шпильковий фільтр	
Розміри, мм	$l_1 = l_4 = 29{,}8699$ $l_2 = l_3 = 29{,}3358$		$l_1 = l_4 = 27{,}07$ $l_2 = l_3 = 26{,}86$	
Частоти, МГц	максимальне загасання в смузі пропускання $a_П$ =3 дБ	загасання в смузі загородження $a_З$ = 30 дБ	максимальне загасання в смузі пропускання $a_П$ =3 дБ	загасання в смузі загородження $a_З$ = 30 дБ
f_{c-}	950,05	–	955,09	–
f_{c+}	1054,30	–	1049,00	–
$f_{з-}$	–	851,45	–	865,02
$f_{з+}$	–	1206,20	–	1188,50

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Аналіз отриманих даних показує, що шпильковий фільтр має кращі характеристики за межами смуги пропускання і, одночасно, вужчу смугу пропускання порівняно з класичним фільтром.

Для коригування ширини смуги пропускання шпилькового фільтра вводиться поправка граничних частот вихідних даних, що обчислюється за формулою:

$$\Delta f_{П} = \frac{f_{c+} - f_{c-}}{fш_{c+} - fш_{c-}} \cdot f_{c+} - f_{c-}, \tag{10}$$

де f_{c-}, f_{c+} – граничні частоти смуги пропускання класичного фільтра на зв'язаних лініях, отримані з використанням Microwave Office; $fш_{c-}$, $fш_{c+}$ – граничні частоти смуги пропускання шпилькового фільтра.

Поправка, що вводиться, приводить до незначних змін g – параметрів крайніх елементів фільтра прототипу нижніх частот і, як наслідок, до невеликих змін розмірів зв'язаних ліній ланок фільтра [5]. Кількість ланок фільтра, як правило, залишається незмінним. Цей підхід дає змогу зменшити обсяг обчислень, необхідних у проектуванні шпилькових фільтрів, і простий у реалізації.

Висновки. Під час проектування СПФ використовують методики квазістатичного аналізу для уточнення номінальних розмірів фільтра. Досліджено вплив допусків на характеристики СПФ на зв'язаних лініях за умови взаємонезалежної зміни параметрів фільтра. Показано, що на певних етапах технологічного процесу виготовлення фільтра можна значно знизити вимоги до точності реалізації. Для одержання заданої амплітудо-частотної характеристики виконана оптимізація топології шпилькового фільтра.

Напрямок подальших досліджень пов'язаний з пошуком конструктивних способів розширення допусків на параметри мікросмужкових фільтрів і розробкою автоматизованих процедур їхньої оптимізації.

1. Конструкторско-технологические основы проектирования полосковых микросхем / Под ред. И. П. Бушминского. – М., 1987. 2. Воробьёв Е. А. Расчёт производственных допусков устройств СВЧ. – Л., 1980. 3. Шило Г.М. Формування інтервальних моделей для обчислення допусків // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – №1, 2002. – С. 90–95. 4. Krischuk V., Shilo G., Gaponenko N. Optimization of ISLAE solutions in the problems of assigning tolerances for parameters of electronic devices // Proceedings of the International Conference "Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science". – Lviv (Ukrane). – 2002. – P.114–115. 5. Малорацкий Л.Г., Явич Л.Р. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. – М., 1972. 6. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. – М., 1967. 7. Krishuk V., Farafonov A., Romanenko S. Analysis of projection methods of microstrip coupled lines filters // Proceedings of the International Conference Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. – Lviv-Slavsko (Ukrane). – 2004. – P.583–586. 8. Akhtarzad S., Rowbotham T., Johns P. The design of coupled microstrip lines // IEEE Transaction on microwave theory and techniques – Vol. MTT-23, № 6, 1975. – P. 486 – 492. 9. Проектирование интегральных устройств СВЧ.: Справочник / Ю. Г. Ефремов, В. В. Конин, Б. Д. Солганик и др. – К., 1990. 10. Weiss J. Microwave propagation on coupled pairs of microstrip transmission lines // Advances in Microwaves, 1974, No. 8, P. 295 – 320. 11. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / С.И. Бахарев, В.И. Вольман, Ю.Н. Либ и др.; Под ред. В.И. Вольмана. – М., 1982. 12. Wheeler H. Transmission-line properties of a strip on a dielectric sheet on a plane // IEEE Transaction on microwave theory and techniques, vol. MTT-25, № 8, 1977. – P. 631 – 647. 13. Гупта К., Гардж Р., Чадха Р. Машинное проектирование СВЧ-устройств: – М., 1987. 14. Silvester P. and Benedek P. Equivalent capacitances of microstrip open circuits // IEEE Transaction on microwave theory and techniques, vol. MTT-20, № 8, 1972. – P. 511–516.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua