

УДК 621.372.852.001.11

В.М. Крищук, О.Ю. Фарафонов, Г.М. Шило, М.П. Гапоненко
Запорізький національний технічний університет,
кафедра КВР

ОПТИМІЗАЦІЯ ДОПУСКІВ МІКРОСМУЖКОВИХ ФІЛЬТРІВ

© Крищук В.М., Фарафонов О.Ю., Шило Г.М., Гапоненко М.П., 2003

Запропоновано процедуру оптимізації допусків мікросмужкових фільтрів з урахуванням зв'язків між допусками різних елементів конструкції. Використовується реалізація фільтрів на основі елементів із зосередженими параметрами. Модель для обчислення допусків формується відображенням передаточних функцій у простір інтервальних величин. Запропоновані інтервальні моделі враховують розподілений характер лінії передачі сигналу. Надаються результати оптимізації для мікросмужкового фільтра нижніх частот. Визначено найбільш критичні до допусків елементи конструкції.

The procedure of optimization of microstrip filters tolerances allowing for correlation of member tolerances is proposed. The filters realized on the basis of elements with lumped parameters are considered. Model for calculating tolerances is shaped by mapping transfer functions into space of interval values. The offered interval models take into account the distributed character of a transmission line of a signal. The results of optimization for the microstrip low-pass filter are given. Members most critical to tolerances are defined.

Існуючі методи обчислення фільтрів надвисокочастотного діапазону не враховують при синтезі усі елементи заступних схем ділянок мікросмужкових ліній або не дають можливості незалежно змінювати в широких межах конструктивні параметри ділянок ліній [1, 2]. Це зменшує можливості вибору оптимальних розмірів фільтра при призначенні допусків. Для усунення цього недоліку пропонується процедура мікросмужкової реалізації фільтрів нижніх частот (ФНЧ), яка враховує усі елементи заступних схем ділянок фільтра.

У запропонованому методі побудови фільтрів спочатку традиційно використовуються фільтри-прототипи нижніх частот із зосередженими параметрами (рис. 1). Кількість ланок фільтра і їх нормовані провідності g_i визначаються за методикою, яка надається в [3]. Між параметрами реактивних елементів і нормованими параметрами фільтра-прототипу існує зв'язок [1]:

$$g_{2i} \cdot Z_0 = \omega_c \cdot L_{2i}; \quad \frac{g_{2i}}{Z_0} = \omega_c \cdot C_{2i-1}, \quad (1)$$

де $\omega_c = 2\pi f_c$ — кутова межова частота смуги пропускання; L_i та C_i — індуктивність та ємність; Z_0 — хвильовий опір лінії передачі.

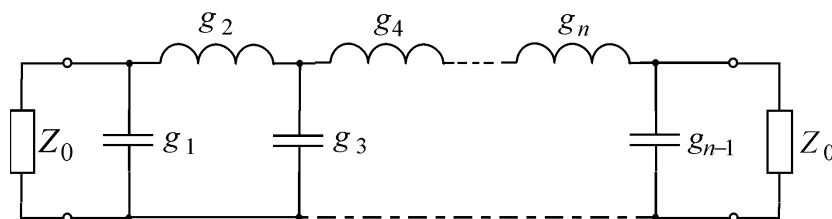


Рис. 1. Схема фільтра-прототипу

При мікросмужковій реалізації зосереджені елементи ланцюгової схеми фільтра-прототипу замінюються ділянками мікросмужкового хвилеводу (рис. 2). Розімкнені поперечні ділянки виконують функції ємнісних елементів із входнім опором:

$$Z'_{2i-1} = Z_{x(2i-1)} \cdot (\text{th } \gamma_{2i-1} l_{2i-1})^{-1}, \quad (l \ll \lambda) \quad (2)$$

де $Z_{x(2i-1)}$ та l_{2i-1} — хвильовий опір та довжина розімкнених ділянок хвилеводу;

$\gamma = \frac{j\omega}{v_\phi}$ — коефіцієнт поширення електромагнітних хвиль; v_ϕ — фазова швидкість

поширення електромагнітних хвиль; λ — довжина хвиль в мікросмужковій лінії.

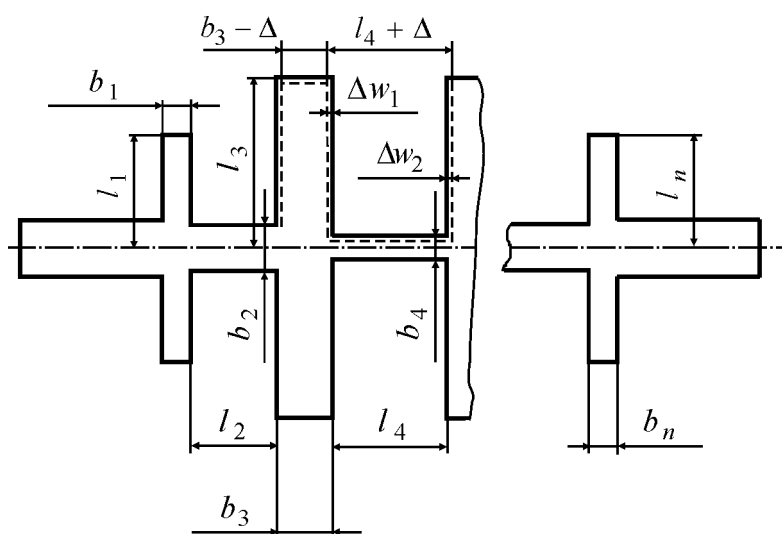


Рис. 2. Ескіз струмонесучої частини мікросмужкового ФНЧ

Індуктивним елементам відповідають повздовжні ділянки мікросмужкового фільтра, які у будь-яких випадках мають заступну схему із трьох комплексних опорів. Найбільш зручним для процедури реалізації є використання П-подібної заступної схеми цих ділянок. Тоді заступна схема мікросмужкового фільтра набуває вигляду, який надається на рис. 3. Опори П-подібних заступних схем повздовжніх ділянок фільтра записуються у вигляді:

$$Z'_{2i} = Z_{x2i} \text{sh } \gamma_{2i} l_{2i}; \quad Z''_{2i} = Z_{x2i} \left(\text{th } \frac{\gamma_{2i} l_{2i}}{2} \right)^{-1}. \quad (3)$$

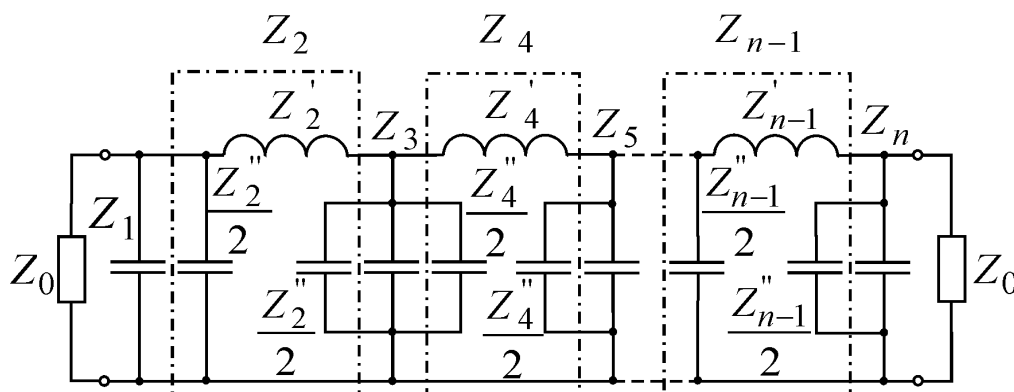


Рис. 3. Заступна схема мікросмужкового фільтра

Вплив допусків параметрів елементів конструкції на передаточну функцію мікросмужкової лінії дослуджувався з урахуванням заміни опорів елементів фільтра-прототипу (1) на опори (2), (3) заступних схем ділянок мікросмужкової лінії:

$$Z_1 = \left(\frac{2}{Z_{x1}} \operatorname{th} \gamma_1 l_1 + \frac{1}{Z_{x2}} \operatorname{th} \frac{\gamma_2 l_2}{2} \right)^{-1}; \quad (4)$$

$$Z_{2i} = Z_{x2i} \operatorname{sh} \gamma_{2i} l_{2i}; \quad (5)$$

$$Z_{2i-1} = \left(\frac{2}{Z_{x(2i-1)}} \operatorname{th} \gamma_{2i-1} l_{2i-1} + \frac{1}{Z_{x2(i-1)}} \operatorname{th} \frac{\gamma_{2(i-1)} l_{2(i-1)}}{2} + \frac{1}{Z_{x2i}} \operatorname{th} \frac{\gamma_{2i} l_{2i}}{2} \right)^{-1} \quad (6)$$

Із співвідношень (1), (4)—(6) визначаються характеристичні опори ділянок мікросмужкової лінії. Повздовжнім ділянкам відповідає характеристичний опір:

$$Z_{x2i} = Z_0 \cdot g_i \cdot \left(\sin \frac{\omega_c}{v\phi_{2i}} l_{2i} \right)^{-1}. \quad (7)$$

Характеристичні опори розімкнених ділянок мікросмужкової лінії, які замінюють ємнісні елементи, визначаються з допомогою співвідношень:

$$Z_{x1} = 2 \cdot \left[\frac{g_i}{Z_0} - \frac{1}{Z_{x2}} \operatorname{tg} \left(\frac{\omega_c l_2}{2v\phi_2} \right) \right]^{-1} \operatorname{tg} \frac{\omega_c l_1}{v\phi_1}; \quad (8)$$

$$Z_{x(2i-1)} = 2 \cdot \left[\frac{g_{2i-1}}{Z_0} - \frac{1}{Z_{x2(i-1)}} \operatorname{tg} \left(\frac{\omega_c l_{2(i-1)}}{2v\phi_{2(i-1)}} \right) - \frac{1}{Z_{\phi_{2i}}} \operatorname{tg} \left(\frac{\omega_c l_{2i}}{2v\phi_{2i}} \right) \right]^{-1} \operatorname{tg} \left(\frac{\omega_c l_{2i-1}}{v\phi_{(2i-1)}} \right). \quad (9)$$

Формування моделей для обчислення допусків завершується визначенням номінальних розмірів ділянок мікросмужкової лінії і фазової швидкості поширення електромагнітних хвиль. Довжина ділянок визначалася із умови:

$$l_i \ll \lambda_i,$$

де λ — довжина хвиль в мікросмужковій лінії.

Ширина ділянок лінії обчислювалась за відомими характеристичними опорами ділянок, діелектричній проникності матеріалу і товщині підкладки [4]:

$$b_i = \begin{cases} \frac{8 \cdot d}{e^k - 2e^{-k}}, & (k > 2,1); \\ \frac{2(k_1 - 1)}{\pi} - \frac{2 \ln(2k_1 - 1)}{\pi} + \frac{(\epsilon - 1) \cdot \left(\ln(k_1 - 1) + 0,293 - \frac{0,517}{\epsilon} \right)}{\pi \epsilon}, & (k \leq 2,1). \end{cases} \quad (10)$$

$$k = \frac{Z_i}{60} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon + 1}{2}} + \frac{(\epsilon - 1) \cdot \left(0,226 + \frac{0,12}{\epsilon} \right)}{\epsilon + 1}; \quad k_1 = \frac{60 \cdot \pi^2}{Z_i \cdot \sqrt{\epsilon}}.$$

де b_i — ширина ділянки мікросмужкової лінії; ϵ та d — діелектрична проникність та товщина діелектричної підкладки.

Фазова швидкість залежить від еквівалентної діелектричної проникності ділянки:

$$v_{\phi_i} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{ei}}}, \quad \varepsilon_e = \left(\frac{Z_{ei}}{Z_{xi}} \right)^2, \quad (11)$$

де c — швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі; ε_e — еквівалентна діелектрична проникність ділянки; Z_{ei} — характеристичний опір ділянок мікросмушкової лінії при $\varepsilon = 1$.

Співвідношення (4)—(11) досить складні для безпосереднього обчислення допусків. Тому з використанням цих співвідношень для коефіцієнта передачі фільтра утворювались спрощені моделі. Найбільш точними моделями, які враховують нелінійну залежність коефіцієнта передачі від параметрів мікросмушкової лінії та взаємну компенсацію відхилень, є інтервальні моделі [5, 6]. Ці моделі зручно використовувати для обчислення і оптимізації допусків.

Як приклад розглядається обчислення допусків на елементи конструкції мікросмушкового ФНЧ з частотною характеристикою максимально площинного типу (апроксимація Батерворта) і параметрами:

- межа частота смуги пропускання $f_c = 700$ МГц при максимальному загасанні $a_c = 3$ дБ;
- загасання $a_3 \geq 30$ дБ на частоті $f_3 = 1150$ МГц;
- хвильовий опір мікросмушкової лінії передачі $Z_0 = 50$ Ом.

Цим параметрам відповідає мікросмушковий ФНЧ із 7 ланок. При виготовленні фільтра на підкладках з діелектричною проникністю $\varepsilon = 9,6$ і товщиною підкладки $d = 1$ мм. визначені номінальні розміри ділянок фільтра, які надаються в табл. 1.

Таблиця 1

Номінальні розміри ділянок фільтра

Ділянки	1	2	3	4	5	6	7
b_i , мм	0,840	0,113	0,983	0,057	0,983	0,113	0,840
l_i , мм	4,257	17,771	16,911	26,829	16,911	17,771	4,257

При формуванні інтервальної моделі використовувались відхилення параметрів $\delta_i = \pm 2\%$. Коефіцієнт передачі ФНЧ обчислювався на частоті $f = 800$ МГц. У результаті застосування алгоритму утворення спрощених інтервальних моделей була сформована модель, яка мала вигляд:

$$\mathbf{H} = [-16,998; -30,463] + \text{dual}([-0,330; -0,189] \mathbf{b}_1) + \text{dual}([-5,058; -1,677] \mathbf{b}_2) + [1,604; 2,809] \mathbf{b}_3 + \\ + \text{dual}([-19,133; -11,741] \mathbf{b}_4) + [1,604; 2,809] \mathbf{b}_5 + \text{dual}([-5,058; -1,677] \mathbf{b}_6) + \\ + \text{dual}([-0,330; -0,189] \mathbf{b}_7) + \text{dual}([-0,133; -0,077] \mathbf{l}_1) + [0,056; 0,126] \mathbf{l}_2 + [0,249; 0,425] \mathbf{l}_3 +$$

$$+[0,134; 0,199] \mathbf{l}_4 + [0,249; 0,425] \mathbf{l}_5 + [0,056; 0,126] \mathbf{l}_6 + \text{dual}([-0,133; -0,077] \mathbf{l}_7) + \\ + \text{dual}([-2,870; -1,699] \mathbf{d}) + [0,655; 1,068] \boldsymbol{\varepsilon}.$$

де $\mathbf{b}_i = [\underline{b}_i; \bar{b}_i]$ — інтервальні параметри; $\text{dual}[\underline{b}_i; \bar{b}_i] = [\bar{\delta}_i; \underline{\delta}_i]$; \underline{b}_i та \bar{b}_i — нижня та верхня межа інтервалів.

Значення коефіцієнтів інтервальної моделі та допустимі відхилення параметрів елементів конструкції мікросмужкового ФНЧ визначались при допустимому відхиленні коефіцієнта передачі $\delta_H = \pm 10\%$. В результаті застосування ітераційного алгоритму оптимізації допусків при незалежній зміні параметрів елементів конструкції були отримані оптимальні значення параметрів моделі і відхилень, які забезпечують максимальний об'єм допуску (табл. 2).

Таблиця 2

Оптимальні значення параметрів моделі і відхилень при незалежній зміні параметрів

Елемент	\underline{a}_i	\bar{a}_i	$\underline{\delta}_i, \%$	$\bar{\delta}_i, \%$
	-19,851	-26,128		
b_1	-0,273	-0,236	8,040	8,287
b_2	-3,782	-2,4415	4,333	5,989
b_3	1,889	2,399	0,888	0,783
b_4	-16,781	-13,374	1,915	2,142
b_5	1,889	2,399	0,887	0,783
b_6	-3,782	-2,441	4,333	5,989
b_7	-0,273	-0,236	8,040	8,287
l_1	-0,109	-0,096	3,959	4,010
l_2	0,072	0,101	1,285	1,027
l_3	0,289	0,367	0,337	0,297
l_4	0,148	0,180	0,415	0,381
l_5	0,289	0,367	0,337	0,297
l_6	0,072	0,101	1,285	1,027
l_7	-0,109	-0,096	3,959	4,010
d	-2,528	-1,923	0,730	0,856
$\boldsymbol{\varepsilon}$	0,737	0,946	0,232	0,203

Аналіз табл. 2 показує, що найбільш критичними до допусків є центральні ділянки ФНЧ. Особливі вимоги ставляться до ширини ділянок, які при мікроелектронній реалізації необхідно витримувати з точністю 1-2 мкм. Ширина допуску може бути розширена, якщо враховувати взаємний вплив допусків, що пов'язано з особливістю мікроелектронної

технології, при якій усі ділянки виготовляються в єдиному технологічному циклі. Будемо вважати, що ширина усіх ділянок фільтра змінюється однаково на величину:

$$\Delta = b_{n4} \left(\frac{b_4}{b_{n4}} - 1 \right) \quad (12)$$

де b_{n4} — номінальне значення ширини четвертої ділянки мікросмужкового ФНЧ.

Тоді інтервальна модель може бути сформована тільки для трьох параметрів ε , b_4 та d . З урахуванням (12) довжина і ширина ділянок фільтра (рис. 2) записується через величину геометричного допуску на топологію:

$$l_{2i-1} = l_{2i-1} + \Delta; \quad l_{2i} = l_{2i} - \Delta; \quad b_i = b_{ni} + \Delta.$$

У результаті застосування алгоритму утворення спрощених інтервальних моделей була сформована модель для коефіцієнтів передачі:

$$\mathbf{H} = [-2,015; -2,133] + \text{dual}([-19,345; -15,715] \mathbf{b}_4) + \text{dual}([-2,399; -2,065] \mathbf{d}) + [0,811; 0,880] \varepsilon.$$

При допустимих відхиленнях на коефіцієнт передачі $\delta_H = 5\%$ після завершення процедури оптимізації допусків максимального об'єму були визначені оптимальні параметри моделі і допусків, які надаються в табл. 3.

Таблиця 3

Оптимальні параметри моделі і допусків при мікроелектронній реалізації

Елементи	\underline{a}_i	\bar{a}_i	$\underline{\delta}_i, \%$	$\bar{\delta}_i, \%$
–	-1,950	-2,193	–	–
b_4	-18,734	-16,204	4,428	4,938
d	-2,351	-2,104	2,027	2,185
ε	0,812	0,878	0,590	0,565

Аналіз табл. 3 показує, що мікроелектронне виконання ФНЧ дозволяє значно підвищити допустимі відхилення на параметри елементів мікросмужкового фільтра з одночасним зменшенням допуску на коефіцієнт передачі. Запропонований підхід дозволяє не тільки визначити оптимальні допуски, врахувати особливості мікроелектронної реалізації фільтра, але і провести оптимізацію номінальних розмірів ділянок мікросмужкового ФНЧ.

1. *Конструирование и расчет полосковых устройств / Под ред. И.С. Ковалева. — М.: Сов. радио, 1974. — 295 с.* 2. *Малорацкий Л.Г., Явич Л.Г. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях. — М.: Сов. радио, 1972. — 232 с.* 3. *Фельдштейн Л.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. — М.: Сов. радио, 1967. — 651 с.* 4. *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.: Радио и связь, 1982.—328 с.* 5. *Шило Г.М. Формування інтервальних моделей для обчислення допусків // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. — 2002. — №1. — С. 90—95.* 6. *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 (Ukraine). — 2002. — P.114—115.*