

# Смугові фільтри на основі ортогональних резонаторів

Нелін Є. А., Непочатих Ю. В.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна

E-mail: nepochatykh794@gmail.com

Частотні фільтри, особливо смугові, необхідні для радіотехнічних систем різного призначення. Бурхливий розвиток радіотехнічних, зокрема телекомунікаційних, систем зумовлює постійне посилення вимог до смугових фільтрів, а це, зі свого боку, — пошук нових, більш ефективних конструктивних рішень. Тенденції останніх років ґрунтуються на підвищенні крутості амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) фільтра формуванням нулів поблизу смуги пропускання. Ці нулі зумовлені додатковими зв'язками між елементами фільтра або, за безпосереднього зв'язку, — шлейфами. У досліджуваних конструкціях як базові структури смугового фільтра використовують різні модифікації поодиноких резонаторів. У статті як базову запропоновано структуру на основі двох резонаторів, розташованих ортогонально. Подовжній (відносно напрямку поширення хвилі) резонатор утворено півхвильовим відрізком довгої лінії, а поперечний — двома розімкнутими або розімкнутим та короткозамкнутим шлейфами. Для моделювання використано модель довгої лінії без втрат. Досліджено АЧХ структури на основі ортогональних резонаторів (ОР). Зі зменшенням характеристичного імпедансу подовжнього резонатора смуга пропускання розширюється. Оскільки нулі АЧХ поблизу смуги пропускання зафіксовані шлейфами, у цьому випадку зростає прямокутність характеристики. Для формування високопрямокутної АЧХ фільтра достатньо 2–3 структур. Введення двох додаткових чвертьхвильових відрізків основної лінії, що прилягають до ОР-структури, призводить до зниження рівня бокових пелюсток АЧХ. Параметри розглянутої ОР-структури з відрізками достатні для її застосування як простого фільтра. Досліджено АЧХ фільтрів на основі двох та трьох зв'язаних ОР-структур. Зв'язок виконано чвертьхвильовим відрізком основної лінії. Параметри АЧХ фільтрів відповідають еліптичній характеристиці відповідно шостого і восьмого порядків. Розглянуто фільтр на основі двох зв'язаних ОР-структур з розімкнутим та короткозамкнутим шлейфами. Амплітудно-частотна характеристика такого фільтра має розширені смуги подавлення.

*Ключові слова:* смуговий фільтр; резонатор; довга лінія; розімкнутий шлейф; короткозамкнутий шлейф

DOI: [10.20535/RADAP.2022.90.31-36](https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.90.31-36)

## Вступ

Частотні фільтри необхідні для радіотехнічних систем різного призначення. Методика проектування фільтрів, зокрема мікросмужкових, є класичною [1–3]. Смуговий фільтр забезпечує пропускання сигналів у смузі пропускання й подавлення в смугах подавлення. Перехідні смуги між цими смугами мають бути якомога вужчими. Найбільш прямокутною амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) є еліптична.

Бурхливий розвиток радіотехнічних, зокрема телекомунікаційних, систем зумовлює постійне посилення вимог до смугових фільтрів, а це, зі свого боку, — пошук нових, більш ефективних конструктивних рішень. Тенденції останніх років ґрунтуються на підвищенні крутості АЧХ фільтра формуванням нулів поблизу смуги пропускання. Ці нулі

зумовлені додатковими зв'язками між елементами фільтра або, за безпосереднього зв'язку, — шлейфами [4–12]. У досліджуваних конструкціях як базові структури смугового фільтра використовують різні модифікації поодиноких резонаторів. Ефективним є резонатор на основі двох розімкнутих шлейфів [13], розвинутий як базова структура смугового фільтра в [14].

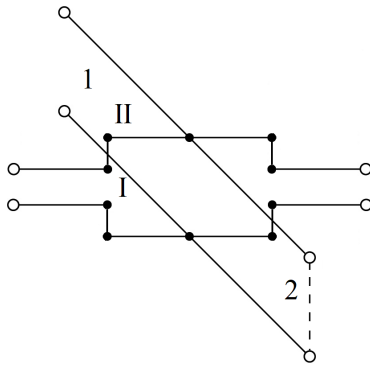
У статті як базову запропоновано структуру на основі двох ортогональних резонаторів (ОР), досліджено АЧХ структури та фільтрів на її основі. На відміну від резонансної характеристики поодинокого резонатора характеристика ОР-структури смугова. Для формування АЧХ фільтра достатньо 2–3 структур.

Моделювання виконано на основі моделі довгої лінії (ДЛ) без втрат. Характеристичні і вхідні імпеданси та адмітанси нормовано до характери-

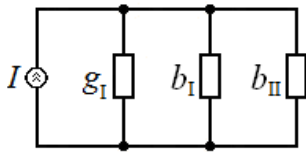
стичного імпедансу та адмітансу ДЛ відповідно, довжини елементів — до резонансної довжини хвилі, а частоту — до резонансної частоти.

## 1 Структура на основі ОР

На Рис. 1а наведено структуру на основі ОР I та II. Резонатор I — подовжній відносно напрямку поширення хвилі, а резонатор II — поперечний. Резонатор I виконано на основі півхвильового відрізка ДЛ. Резонатор II утворено розімкнутими або розімкнутим та короткозамкнутим шлейфами. Закоротку показано штриховою лінією. Шлейфи резонатора II під'єднано до ДЛ всередині резонатора I.



(а)



(б)

Рис. 1. Структура на основі ОР (а) та еквівалентна схема ОР-структури в ДЛ (б); I, II — резонатори, 1, 2 — шлейфи; I — джерело струму

Довжини шлейфів:  $l_1 = 0,25(1 - \alpha_1)$ ;  $l_2 = 0,25(1 + \alpha_2)$  (розімкнутий),  $l_2 = 0,25\alpha_2$  (короткозамкнутий), де індексами «1» та «2» позначено параметри шлейфів 1 та 2;  $\alpha_{1,2} \ll 1$ . Якщо  $\alpha_1 = \alpha_2$ , резонатор II — півхвильовий або чверть хвильовий у разі розімкненого й короткозамкнутого шлейфа 2 відповідно.

Вхідний адмітанс відрізка ДЛ визначає формула

$$y = \frac{1 + iz_n z^{-1}t}{z_n + izt}, \quad (1)$$

де  $i = \sqrt{-1}$ ;  $z_n$  — імпеданс навантаги;  $z$  — характеристичний імпеданс відрізка;  $t = \operatorname{tg}kl$ ,  $k = 2\pi F$ ,  $F$  — частота,  $l$  — довжина відрізка.

Для резонатора I  $z_n = 1$ . Вхідний адмітанс резонатора I, що дорівнює  $y_I = g_I + ib_I$  ( $g_I$  та  $b_I$  — активна та реактивна складові), знайдемо в точках підключення шлейфів як суму вхідних адмітансів чвертьхвильових відрізків резонатора в прямому та зворотному напрямках поширення хвилі.

У разі розімкнутого шлейфа  $z_n = \infty$ , а короткозамкнутого —  $z_n = 0$ . З виразу (1) для вхідного адмітансу шлейфа отримаємо  $y = ib$ , де  $b = z^{-1}t$  та  $b = -z^{-1}t^{-1}$  відповідно за розімкнутого та короткозамкнутого шлейфів. Вхідний адмітанс резонатора II дорівнює  $y_{II} = ib_{II} = i(b_1 + b_2)$ .

На Рис. 1б зображено еквівалентну схему ОР-структури в ДЛ. Зважаючи на цю схему, АЧХ структури визначає вираз

$$H = \frac{1}{\sqrt{1 + (b_\Sigma/g_I)^2}}, \quad (2)$$

де  $b_\Sigma = b_1 + b_{II}$ .

Розглянемо АЧХ ОР-структури та фільтрів на основі цієї структури. За винятком фільтра, розглянутого у розділі 4, резонатор II сформовано розімкнутими шлейфами.

Рисунок 2 ілюструє залежність форми АЧХ ОР-структури від характеристичного імпедансу резонатора I згідно з (2). Параметри структури та АЧХ 4 наведено в Табл. 1 (фільтр 1), де  $\delta F$  — відносна ширина смуги пропускання за рівнем  $-3$  дБ;  $\delta_1$  — рівень пульсацій у смугі пропускання;  $\delta_2$  — рівень бокових пелюсток;  $k_{пр}$  — коефіцієнт прямокутності за рівнями бокових пелюсток та пульсацій у смугі пропускання;  $n$  — порядок еліптичної характеристики, що відповідає значенням  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  та  $k_{пр}$  згідно з [1].

Характеристика 1 — АЧХ резонатора II. Зі зменшенням  $z$  смуга пропускання розширюється. У смугі пропускання АЧХ 4  $(b_\Sigma/g_I)^2 \ll 1$ , що забезпечують частотні залежності цих елементів. Унаслідок різкого збільшення  $|b_{II}|$  і зменшення  $g_I$  формуються перехідні смуги. Висока прямокутність АЧХ 4 зумовлена високою крутістю частотної залежності  $b_{II}$  поблизу точки розриву функції  $\operatorname{tg}x$ . Точки розривів формують два нулі АЧХ.

Зазначимо, що зі збільшенням  $z$  смуга пропускання звужується, що за  $z > 1$  дозволяє збільшити добротність резонатора II [15, 16].

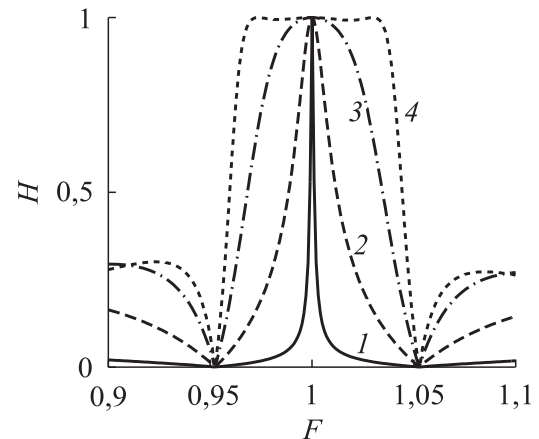


Рис. 2. Амплітудно-частотна характеристика ОР-структури;  $z = 1; 0,3; 0,14; 0,08$  (1–4 відповідно)

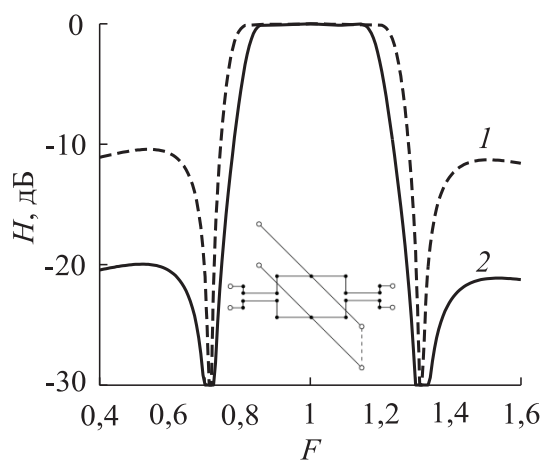
Табл. 1

№	$\alpha_{1,2}$	$z$	$z_{1,2}$	$z_{\text{в}}$	$\delta F, \%$	$\delta_1, \text{дБ}$	$\delta_2, \text{дБ}$	$\kappa_{\text{пр}}$	$n$
1	0,05	0,08	0,16	-	8	0,07	-10	1,43	3
2	0,05	0,44	0,32	2,94	6	0,1	-20	1,76	4

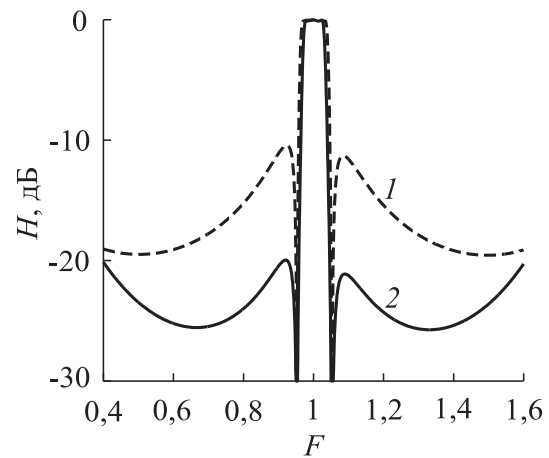
Можна очікувати, що за умови смугової АЧХ базової структури для формування АЧХ фільтра достатньо декількох структур.

Недолік фільтра 1 у високому рівні бокових пелюсток. Крім того, значення характеристичного імпедансу мають конструктивно-технологічні обмеження. Для двовимірних мікросмужкових елементів межі цих значень дорівнюють приблизно 0,4...2, а тривимірних — 0,08...8 (за характеристичного імпедансу ДЛ 50 Ом).

Покажемо, що додаткові відрізки дозволяють зменшити рівень бокових пелюсток та послабити вимоги до значень характеристичного імпедансу.



(a)



(б)

Рис. 3. Амплітудно-частотні характеристики фільтрів 1 (1) та 2 (2) у вузькому (а) та широкому (б) діапазонах частот

### 3 Фільтри на основі зв'язаних ОР-структур

Розглянемо конструкції та АЧХ фільтрів на основі ОР-структур (без додаткових відрізків), зв'язаних чвертьхвильовим відрізком ДЛ з характеристичним імпедансом  $z_{\text{зв}}$  (Рис. 4, Табл. 2, № 3, 4). Структура фільтра симетрична, резонатори II ідентичні. За винятком середнього резонатора I фільтра

### 2 Фільтр на основі ОР-структури з відрізками

Відрізки прилягають до ОР-структури (див. візку на Рис. 3а). Довжина відрізків — чвертьхвильова, а характеристичний імпеданс  $z_{\text{в}} > 1$ . На Рис. 3 зображено АЧХ такої структури, а в Табл. 1 — її параметри (фільтр 2). Для порівняння наведено АЧХ фільтра 1.

Як бачимо, в ОР-структурі з відрізками рівень бокових пелюсток нижчий на 10 дБ і вимоги до значень характеристичного імпедансу резонаторів не такі жорсткі. Порядок еліптичної характеристики, що відповідає параметрам АЧХ, підвищився з 3 до 4, хоча прямокутність АЧХ дещо гірша. Параметри АЧХ фільтра 2 задовольняють вимоги до простого фільтра.

4, характеристичні імпеданси половин (чвертьхвильових відрізків) резонаторів I — різні. Позначення в Табл. 2:  $m$  — число ОР-структур;  $z$  — характеристичний імпеданс середнього резонатора I фільтра 4;  $z_{11}$  та  $z_{12}$  — характеристичні імпеданси відповідно зовнішніх (на вході і виході фільтра) і внутрішніх чвертьхвильових відрізків інших резонаторів I.

Як бачимо, для синтезу високопрямокутної АЧХ фільтра достатньо двох-трьох зв'язаних ОР-структур. Форма АЧХ — квазіеліптична.

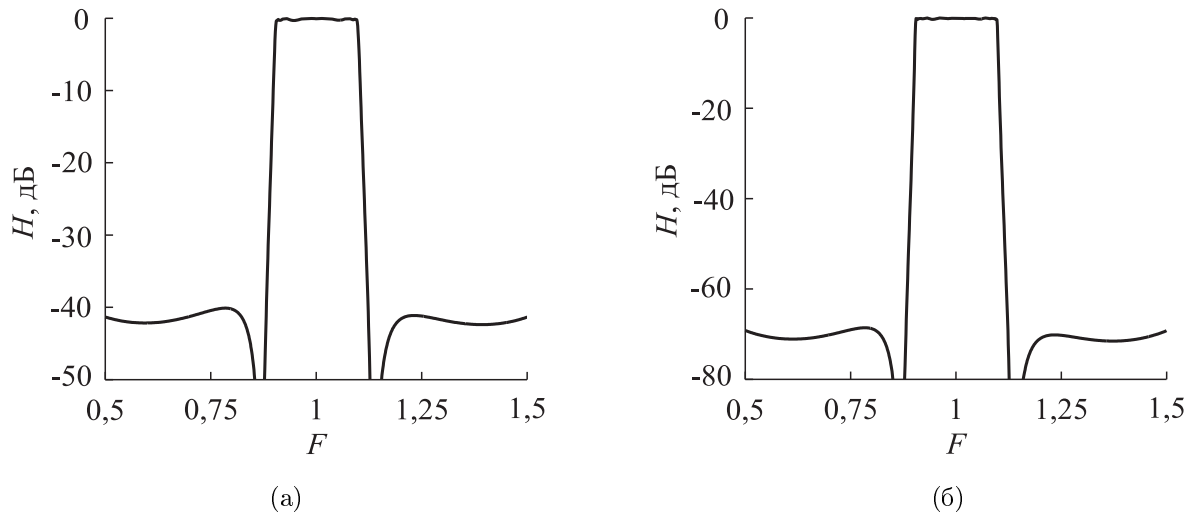


Рис. 4. Амплітудно-частотні характеристики фільтрів 3 (а) та 4 (б)

Табл. 2

№	$m$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$z_{11}$	$z_{12}$	$z$	$z_1$	$z_2$	$z_{зв}$	$\delta F, \%$	$K_{пр}$	$\delta_1, \text{дБ}$	$\delta_2, \text{дБ}$	$n$
3	2	0,12	0,15	0,16	0,28	-	0,22	0,18	2,74	20	1,26	0,3	-40	8
4	3	0,12	0,15	0,16	0,30	0,36	0,22	0,18	3,26	20	1,26	0,3	-69	6
5	2	0,09	0,06	0,26	0,48	-	0,16	0,34	2,60	20	2,96	0,3	-41	-

#### 4 Фільтр з розширеними смугами подавлення

На Рис. 5 наведено АЧХ фільтра 3 у широкому діапазоні частот. Недолік АЧХ у наявності відгуків на нульовій та подвоєній частотах, що звужують смуги подавлення. Ці відгуки зумовлені відгукками резонаторів I та II.

Для подавлення паразитних відгуків один зі шлейфів має бути короткозамкнутим.

В ОР-структурі фільтра 5 (Рис. 5, Табл. 2) шлейф 2 – короткозамкнутий. За номінальних довжин елементів фільтра смуга пропускання зміщена в бік нижніх частот, тому довжини елементів зменшено на 8,7%. Як бачимо, відгуків на нульовій та подвоєній частотах немає, смуги подавлення значно розширилися, однак погіршилася прямокутність АЧХ.

#### 5 Обговорення отриманих результатів

Запропоновану структуру утворено двома взаємно навантаженими резонаторами з внутрішнім зв'язком. Взаємозв'язок між резонаторами такий, що зі зменшенням характеристичного імпедансу подовжнього резонатора смуга пропускання ОР-структури розширюється. Оскільки нулі АЧХ по-

близу смуги пропускання зафіксовані шлейфами, у цьому випадку зростає прямокутність характеристики. На відміну від резонансної характеристики поодинокого резонатора як базової структури смугового фільтра АЧХ ОР-структури смугова. У результаті для формування високопрямокутної АЧХ фільтра необхідно лише декілька ОР-структур. Запропоновану структуру можна використати у фільтрах різної конструктивної реалізації (мікросмужкової, коаксіальної та ін.).

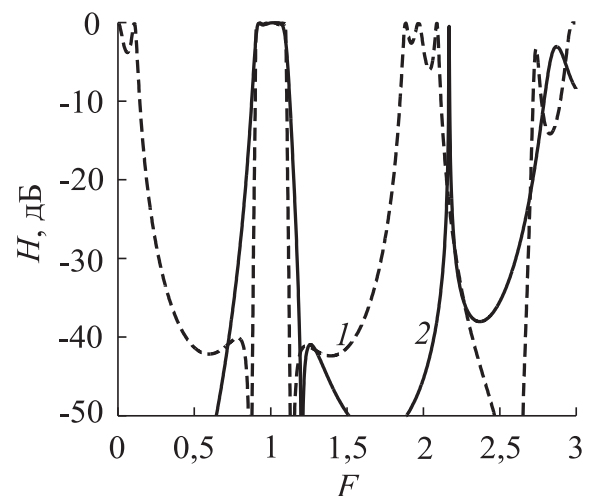


Рис. 5. Амплітудно-частотні характеристики фільтрів 3 (1) та 5 (2)

## Висновки

Для формування АЧХ смугового фільтра достатньо 1...3 ОР-структур. Параметри поодинокі ОР-структури з відрізками задовольняють вимоги до простого фільтра.

Параметри АЧХ синтезованих фільтрів відповідають еліптичній характеристиці 4, 6 та 8 порядку; довжина фільтрів — у межах  $(1...2)\lambda_0$  ( $\lambda_0$  — довжина хвилі на середній частоті), ширина —  $(0,201...0,53)\lambda_0$ .

Застосування короткозамкнутого шлейфа в ОР-структурі забезпечує розширення смуг подавлення фільтра.

## References

- [1] Schaumann R., Xiao H. and Valkenburg Mac E. Van. (2010). *Design of Analog Filters*, 2nd ed. N. Y., Oxford University Press, 832 p.
- [2] Matthaei G. L., Young L. and Jones E. M. T. (1980). *Design of Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*. Norwood, Artech House, 1096 p.
- [3] Hong J.-S. (2011). *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, 2nd ed. N. Y., Wiley, 656 p.
- [4] Tang S.-C., Chu P.-C., Kuo J.-T., Wu L.-K. and Lin C.-H. (2022). Compact Microstrip Wideband Cross-Coupled Inline Bandpass Filters With Miniaturized Stepped-Impedance Resonators (SIRs). *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 21328–21335. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3153710.
- [5] Barik R. K., Koziel S. and Szczepanski S. (2022). Wideband Highly-Selective Band-Pass Filtering Branch-Line Coupler. *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 20832–20838. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3152802.
- [6] Tang D., Qian H. J., Dong Y. and Luo X. (2022). Compact 1.75–2.7 GHz Tunable BPF With Wide Stopband up to 9.5 GHz Using Harmonic-Controlled SIDGS Resonators. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, Vol. 69, Iss. 11, pp. 4228–4232. DOI:10.1109/TCSII.2022.3185805.
- [7] Sánchez-Soriano M. Á. and Quendo C. (2021). Systematic Design of Wideband Bandpass Filters Based on Short-Circuited Stubs and  $\lambda/2$  Transmission Lines. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 31, Iss. 7, pp. 849–852. DOI:10.1109/LMWC.2021.3076924.
- [8] Wu Z., Shi G., Lu X., Liang R., Wen X., Wang J., et al. (2021). A W-band air-filled coaxial bandpass filter employing micro metal additive manufacturing technology. *Int. J. RF Microw. Comput.-Aided Eng.*, Vol. 31, Iss. 1, e22768. DOI:10.1002/mmce.22768.
- [9] Allanic R., Berre D. Le, Quendo C., Chouteau D., Grimal V., Valente D. and Billoué J. (2021). Switchable DBR Filters Using Semiconductor Distributed Doped Areas (ScDDAs). *Electronics*, Vol. 9, Iss. 12. DOI:10.3390/electronics9122021.
- [10] Lu S., Xu K.-D., Guo Y., Ren Y. and Chen Q. (2020). Bandpass filter using coupled-line-stub cascaded structure with high stopband rejection. *Microw. Opt. Technol. Lett.*, Vol. 63, Iss. 1, pp. 69–74. DOI:10.1002/mop.32555.
- [11] Tsukushi T., Ono S. and Wada K. (2020). Bandpass filter with flat passband and transmission zeros using parallel-connected resistor loaded hairpin-shaped resonators. *IEE-CE Electronics Express*, Vol. 17, Iss. 22, pp. 1–6. DOI:10.1587/elex.17.20200320.
- [12] Feng W., Ma X., Shi Y., Shi S. and Che W. (2020). High-Selectivity Narrow- and Wide-band Input-Reflectionless Bandpass Filters with Intercoupled Dual-Behavior Resonators. *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 48, Iss. 2, pp. 446–454. DOI: 10.1109/TPS.2020.2968481.
- [13] *Reference Data for Radio Engineers*, 4th ed. (1956). N. Y., ITTC, 1121 p.
- [14] Quendo C., Rius E. and Person C. (2003). Narrow bandpass filters using dual-behavior resonators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 51, Iss. 3, pp. 734–743. DOI: 10.1109/TMTT.2003.808729.
- [15] Nelin E. A. and Nepochatykh Yu. V. (2022). Improving Parameters of Resonator on Open- and Short-Circuited Stubs. *Visnyk NTUU KPI Seriya-Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*, Vol. 89, pp. 48–53. DOI: 10.20535/RADAP.2022.89. [In Ukrainian].
- [16] Nelin E. A. and Nepochatykh Yu. V. (2022). Selectivity Increasing of Resonator on Open-Circuited Stubs. *IEEE 41st International Conference on Electronics and Nano-technology (ELNANO)*, pp. 558–561. DOI:10.1109/ELNANO54667.2022.9926995.

## Bandpass Filters on Orthogonal Resonators

Nelin E. A., Nepochatykh Yu. V.

**Introduction.** The rapid development of radioengineering, in particular telecommunication, systems leads to a constant tightening of requirements for bandpass filters, and this, in turn, the search for new, more efficient design solutions. In the article, a structure based on two orthogonal resonators (OR) is proposed as the basic structure of a bandpass filter. The transmission response (TR) of the OR-structure and filters on it has been studied.

**1 Structure based on OR.** The structure consists of two resonators. The longitudinal (relative to the direction of wave propagation) resonator is formed by a half wavelength transmission line section, and the transverse one — by two open-circuited or open- and short-circuited stubs. The TR of the OR-structure has been studied. With a decrease in the characteristic impedance of the longitudinal resonator, the bandwidth of the OR-structure expands. Since the TR zeros near the passband are fixed by stubs, in this case the steepness of the characteristic increases.

**2 Filter based on OR with sections.** The design of the OR-structure with two additional quarter wavelength sections of the main line adjacent to the OR-structure is considered. This solution leads to an improvement in the side lobes level and a lowering of the requirements for the characteristic impedance values. The parameters of the considered OR-structure with sections are sufficient for its use as a simple filter.

**3 Filters based on coupled ORs.** The TR of filters based on two and three coupled OR-structures have been studied. The coupling is made by a quarterwavelength section of the main line. The structure of the filter is symmetric,

the transverse resonators are identical. Filter parameters: relative bandwidth 20%, ripple in the bandwidth 0.3 dB, sidelobe level  $-40$  and  $-69$  dB, respectively for filter on two and three OR-structures. Parameters of TRs correspond to the elliptic characteristic of the sixth and eighth orders, respectively.

**4 Filter with extended suppression bands.** The disadvantage of the filter based on open-circuited stubs is the presence of responses at zero and double frequencies. Such responses are absent if in OR-structure one of the stubs is shorted. A filter based on two OR-structures with short-circuited stubs is considered. The filter TR has extended suppression bands.

**5 Results discussion.** Coupling of longitudinal and transverse resonators in the OR-structure is such that its bandwidth expands as the characteristic impedance of the longitudinal resonator decreases. The high steepness of the TR with zeros in the immediate vicinity of the

passband is formed by a transverse resonator based on open-circuited stubs. For a high-rectangular quasi-elliptic TR of a bandpass filter, several OR-structures are sufficient. Proposed structure can be used in filters of various design implementations (microstrip, coaxial, etc.).

**Conclusion.** In the considered filters the number of OR-structures is equal to  $1 \dots 3$ . The parameters of a single OR-structure with sections are sufficient for its use as a simple filter.

The parameters of the synthesized filters correspond to elliptic characteristics of order 4, 6 and 8. The length of the filters is within  $(1 \dots 2)\lambda_0$  ( $\lambda_0$  is the center frequency wavelength) and width  $-(0.201 \dots 0.53)\lambda_0$ .

The filter based on the OR-structure with a short-circuited stub has extended suppression bands.

*Keywords:* bandpass filter; resonator; transmission line; open-circuited stub; short-circuited stub