

Поліпшення параметрів резонатора на основі розімкнутого та короткозамкнутого шлейфів

Нелін Є. А., Непочатих Ю. В.

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

E-mail: nepochatykh794@gmail.com

Розглянуто особливості частотної залежності еквівалентної ємності розімкнутого шлейфа та амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) резонатора на основі розімкнутого та короткозамкнутого шлейфів. Частотна залежність еквівалентної ємності розімкнутого шлейфа призводить до значного її збільшення за резонансу. У результаті досягається висока добротність. Однак, такій ємності відповідає мала індуктивність і, відповідно, непринятно мала довжина короткозамкнутого шлейфа. Недолік традиційного резонатора ще й у низькому значенні характеристичного імпедансу шлейфів. У статті запропоновано два конструктивних рішення, що дають змогу подолати ці недоліки. Показано, що на відміну від традиційного рішення з однаковими імпедансами шлейфів, у разі різноімпедансних шлейфів (високоімпедансного розімкнутого й низькоімпедансного короткозамкнутого) короткозамкнутий шлейф помітно довший. Наведено АЧХ двох варіантів резонатора на основі різноімпедансних шлейфів. Варіанти відрізняються значеннями характеристичних імпедансів шлейфів. Значення характеристичних імпедансів шлейфів першого варіанта задовольняють межах значень для двовимірних мікросмушкових елементів, а другого варіанта — тривимірних. У другому варіанті короткозамкнутий шлейф довший і більш високе подавлення сигналів у смугах подавлення. Як порівняти з традиційним рішенням, довжина короткозамкнутого шлейфа у першому і другому варіантах більша у 2,2 і 3,2 рази відповідно. Друге з запропонованих рішень — введення в конструкцію резонатора відрізка основної лінії передачі. Показано, що у випадку високоімпедансного відрізка добротність резонатора збільшується. Наведено АЧХ резонатора з чвертьхвильовим та півхвильовим відрізками, що підвищують добротність у 3 та 4 рази, як порівняти з випадком без відрізків. Отримано формули для добротності, що дають змогу у першому наближенні вибрати необхідні значення конструктивних параметрів резонатора запропонованої конструкції. Наведено АЧХ резонатора на основі обох запропонованих рішень та виконано порівняння конструктивних параметрів запропонованого і традиційного резонаторів.

Ключові слова: резонатор, довга лінія, розімкнутий шлейф, короткозамкнутий шлейф

DOI: [10.20535/RADAP.2022.89.48-53](https://doi.org/10.20535/RADAP.2022.89.48-53)

Вступ

Вузкосмугові фільтри та осцилятори на основі мікросмушкових резонаторів використовують в радіолокації, бездротовому і мобільному зв'язку, випробувальній та вимірювальній апаратурі в діапазоні частот від одиниць до десятків ГГц. Відомі різноманітні конструкції таких резонаторів [1–5]. Резонансні властивості резонатора визначає добротність, прямо пропорційна крутості частотної залежності реактивних складових опору або провідності резонатора. Висока крутість характерна для шлейфів. Широко застосовують резонатор на основі розімкнутих шлейфів [6–16]. Якщо один зі шлейфів короткозамкнутий, резонатор удвічі коротший і відсутні відгуки на нульовій та подвоєній частотах. Однак, унаслідок суттєвого недоліку — малої

довжини короткозамкнутого шлейфа — такий резонатор не набув поширення.

Мета цієї статті — поліпшення конструктивних і електричних параметрів резонатора на основі розімкнутого та короткозамкнутого шлейфів. Для моделювання використано модель довгої лінії (ДЛ) без втрат. Характеристичні і входні імпеданси та адмітанси нормовано відповідно до характеристичного імпедансу та адмітансу ДЛ, а довжини елементів — до резонансної довжини хвилі.

1 Традиційний резонатор на основі розімкнутого та короткозамкнутого шлейфів

Розглянемо особливості традиційного резонатора на основі розімкнутого та короткозамкнутого

шлейфів (Рис. 1) [5]. Шлейфи мають такі параметри: довжини $l_1 = (1 - \alpha)/4$ та $l_2 = \alpha/4$, де індексами «1» та «2» тут і далі позначено параметри розімкнутого та короткозамкнутого шлейфів, $\alpha < 1$; характеристичні імпеданси шлейфів однакові.

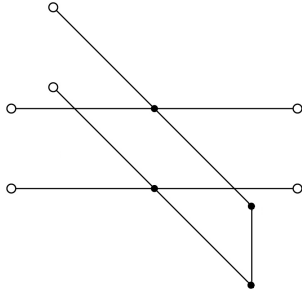


Рис. 1. Резонатор на основі розімкнутого та короткозамкнутого шлейфів

Вхідний адмітанс розімкнутого шлейфа дорівнює $g_1 = iz^{-1} \operatorname{tg} kl_1$, де $i = \sqrt{-1}$; z — характеристичний імпеданс шлейфа; $k = 2\pi F$, $F = f/f_0$, f та f_0 — поточна та резонансна частоти. За умови $kl_1 < \pi/2$ адмітанс шлейфа має ємнісний характер. Еквівалентну ємність шлейфа визначає співвідношення

$$C_{\text{шл}} = \frac{\operatorname{tg} kl_1}{\omega z Z_0}, \quad (1)$$

де $\omega = 2\pi f$; Z_0 — ненормований характеристичний імпеданс Д.Л. У результаті перетворень з (1) отримуємо

$$C_{\text{шл}} = C\eta,$$

де $C = l_1/(zZ_0f_0)$ — еквівалентна ємність шлейфа на низьких частотах (за умови $\operatorname{tg} kl_1 \approx kl_1$); $\eta = \operatorname{tg} x/x$, $x = \pi F(1 - \alpha)/2$. Оскільки $\operatorname{tg} x > x$ і зі збільшенням x функція $\operatorname{tg} x$ зростає швидше ніж x , еквівалентна ємність шлейфа $C_{\text{шл}}$ збільшується з частотою.

На Рис. 2 наведено залежність коефіцієнта η , а також криві 2 та 3 для оцінювання степеня залежності $\eta(x)$. Кривій 2 відповідає вираз

$$\eta = 0,43x + x^n, \quad (2)$$

де $n = x^4$. У діапазоні $0 \leq x \leq 1,5$ модуль відносної похибки (2) не перевищує 9%. За умови $x > 1$ вираз (2) визначає другий доданок. Якщо $x = 1,5$, значення параметрів такі: $\alpha = 0,045$, $\eta = 9,4$ і $n = 5,1$. Ємність збільшилася майже на порядок.

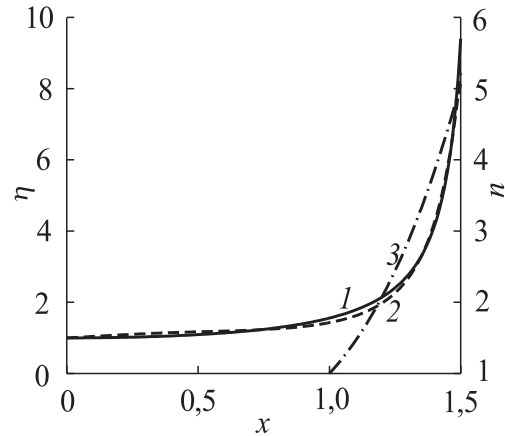


Рис. 2. Залежності коефіцієнта η : точна (1), наближена (2); 3 — залежність показника степеня n

Рисунок 3 ілюструє амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) резонатора на основі розімкнутого та короткозамкнутого шлейфів. На резонансній частоті еквівалентна ємність резонатора в 4,9 раза більша, ніж на низьких частотах. Значна ємність за заданої резонансної частоти призводить до малої індуктивності і, відповідно, до малої довжини короткозамкнутого шлейфа, що ускладнює або й унеможливує його конструктивне виконання. Зважаючи на це, в [5] рекомендовано замінити короткозамкнутий шлейф розімкнутим.

На Рис. 3 для порівняння наведено АЧХ резонатора на основі розімкнутих шлейфів. У смугах подавлення АЧХ значно погіршилася, є відгуки на нульовій та подвоєній частотах. Крім того, удвічі збільшилася довжина резонатора. Як порівняти АЧХ і розміри, резонатор на основі розімкнутого та короткозамкнутого шлейфів має значні потенційні переваги. Розглянемо рішення, що дають змогу подолати вказаний конструктивний недолік цього резонатора.

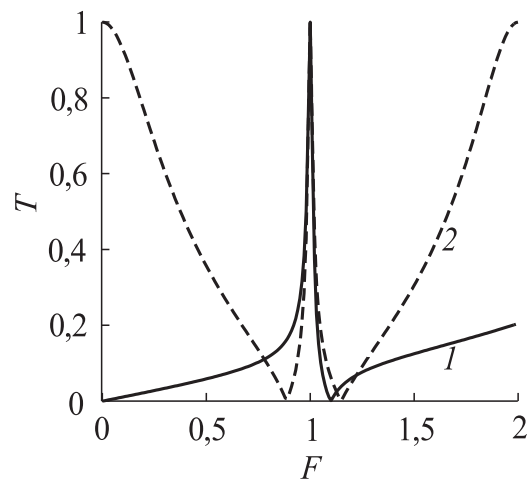


Рис. 3. Амплітудно-частотна характеристика резонатора на основі розімкнутого та короткозамкнутого шлейфів (1) та на основі розімкнутих шлейфів (2). Параметри: добротність $Q = 50$, $z = 0,39$; $\alpha = 0,09$, $l_1 = 0,228$, $l_2 = 0,023$ (1); $l_1 = 0,218$ та $0,282$ (2)

2 Резонатор зі збільшеною довжиною короткозамкнутого шлейфа

Прийемо, що, на відміну від резонатора [5], характеристичні імпеданси шлейфів різні: $z_1 \neq z_2$. Вхідний адмітанс резонатора дорівнює $1 + ig$, де $g = z_1^{-1} \operatorname{tg} k l_1 - z_2^{-1} \operatorname{tg}^{-1} k l_2$, $l_1 = (1 - \alpha_1)/4$, $l_2 = \alpha_2/4$. Після перетворень маємо

$$g = z_1^{-1} \operatorname{tg} [\pi F(1 - \alpha_1)/2] - z_2^{-1} \operatorname{tg}^{-1} (\pi F \alpha_2/2). \quad (3)$$

На резонансній частоті $g=0$. З цієї умови отримаємо

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{\operatorname{tg}(\pi \alpha_2/2)}{\operatorname{tg}(\pi \alpha_1/2)}. \quad (4)$$

Збільшенню довжини короткозамкнутого шлейфа відповідає умова $\alpha_2 > \alpha_1$, а цій умові — співвідношення

$$z_1 > z_2, \quad (5)$$

причому, оскільки $z_1/z_2 \approx \alpha_2/\alpha_1$, довжина зростає приблизно в z_1/z_2 рази. Співвідношення (5) між характеристичними імпедансами розімкнутого та короткозамкнутого шлейфів, необхідне для збільшення довжини короткозамкнутого шлейфа, протилежне традиційному співвідношенню між імпедансами квазісосереджених ємності та індуктивності.

З огляду на схему еквівалентного джерела струму, навантаженого резонатором, на межах смуги пропускання АЧХ маємо $g = 2$. З урахуванням цього, а також (3) та (4) для добротності отримаємо

$$Q \approx \frac{\pi z_1}{8 z_2^2 \operatorname{tg}^2(\pi \alpha_2/2)}. \quad (6)$$

На Рис. 4 наведено АЧХ 1 і 2 варіантів 1 і 2 резонатора з різною імпедансними шлейфами з такою ж добротністю, як і у резонатора на Рис. 3. У варіанті 1 довжина короткозамкнутого шлейфа більша у 2,2 раза, а у варіанті 2 — в 3,2 раза. Значення характеристичних імпедансів шлейфів варіанта 1 задовольняють межах значень для двовимірних мікросмужкових елементів (приблизно 0,4...2, $Z_0 = 50 \text{ Ом}$), а варіанта 2 — тривимірних (приблизно 0,08...8 [17]). Варіант 2 забезпечує більше подавлення сигналів у смугах подавлення. Згідно з (6) добротність резонатора варіанта 1 дорівнює 53, а варіанта 2 — 49, що добре відповідає значенню згідно з АЧХ.

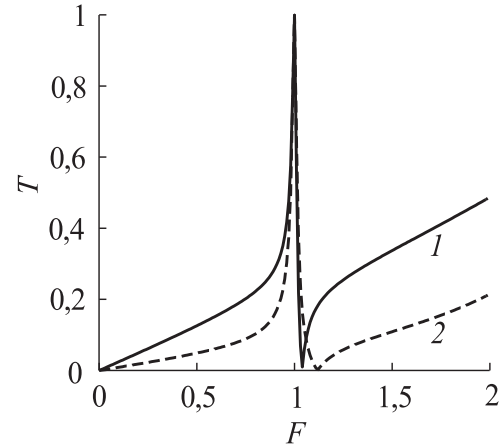


Рис. 4. Амплітудно-частотні характеристики резонатора з різною імпедансними шлейфами. Параметри: $Q = 50$; $\alpha_1 = 0,037$, $\alpha_2 = 0,2$, $z_1 = 2,16$, $z_2 = 0,39$ (1); $\alpha_1 = 0,105$, $\alpha_2 = 0,287$, $z_1 = 0,29$, $z_2 = 0,1$ (2)

3 Резонатор з відрізком лінії передачі

Розглянемо резонатор з відрізком лінії передачі, підключеним до лінії симетрично відносно точок з'єднання шлейфів з лінією (див. вірзку на Рис. 5а). Довжина відрізка дорівнює $l_b = 0,25$ або $0,5$, де індексом «в» позначено параметри відрізка.

З формули для вхідного адмітансу відрізка ДЛ знайдемо вхідний адмітанс відрізка резонатора на резонансній частоті в точках з'єднання шлейфів з лінією:

$$g_b = \frac{2 + i(z_b^{-1} - z_b)}{1 + z_b^2}, \quad l_b = 0,25; \quad (7)$$

$$g_b = z_b^{-2}, \quad l_b = 0,5.$$

З огляду на схему еквівалентного джерела струму, навантаженого резонатором з відрізком, з урахуванням (7) для добротності резонатора з відрізком отримаємо

$$Q' \approx \frac{Q}{(1 - \pi z_2 \alpha_2 \operatorname{Im} g_b) \operatorname{Re} g_b}, \quad l_b = 0,25; \quad (8)$$

$$Q' \approx \frac{Q}{g_b}, \quad l_b = 0,5,$$

де Q відповідає (6); $\operatorname{Re} g_b$ та $\operatorname{Im} g_b$ — активна та реактивна складові вхідного адмітансу g_b . За умови $z_b > 1$ маємо $Q' > Q$.

На Рис. 5а наведено АЧХ резонатора варіанта 1, розглянутого на Рис. 4, з відрізком (2, 3) та для порівняння — без відрізка (1). Добротність АЧХ 2 та 3 дорівнює 153 та 213 відповідно; згідно з (8) — 154 та 194.

Порівняємо резонатори однакової добротності — традиційний (Рис. 3) та на основі запропонованих рішень (з різною імпедансними шлейфами і відрізком, Рис. 5б, Табл. 1).

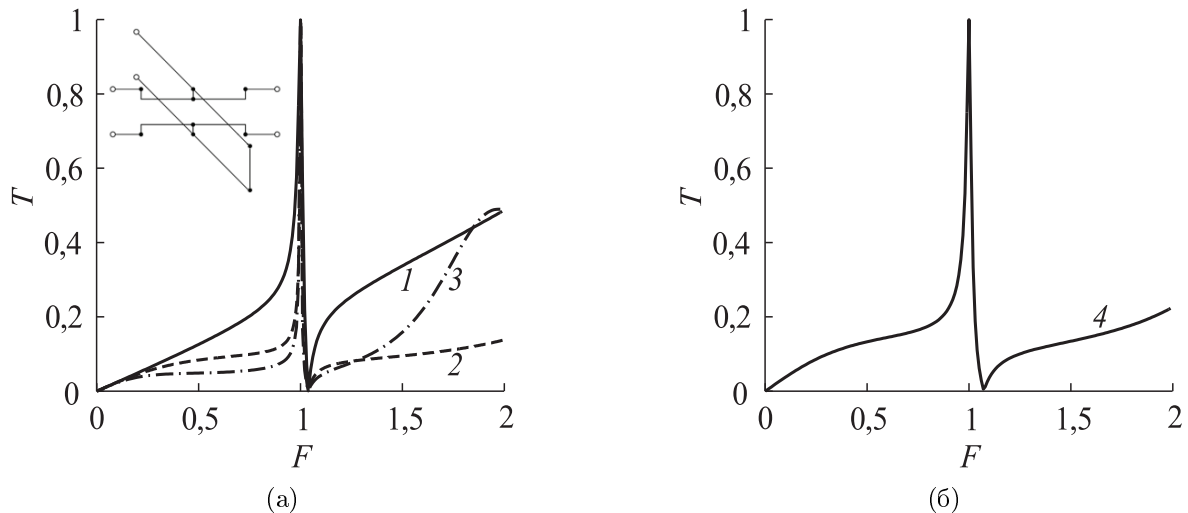


Рис. 5. Амплітудно-частотні характеристики резонатора без відрізка (1) та з відрізком (2–4); $z_b = 2$; $l_b = 0,25$ (2, 4) та $l_b = 0,5$ (3); $\alpha_1 = 0,068$, $\alpha_2 = 0,248$, $z_1 = 1,70$, $z_2 = 0,50$, $Q = 50$ (4)

Табл. 1

Резонатор	Q	l_1	l_2	l_b	z_1	z_2	z_b
Традиційний	50	0,228	0,023	-	0,39	0,39	-
Запропонований	50	0,233	0,062	0,25	1,70	0,50	2,0

У запропонованого резонатора довжина короткозамкнутого шлейфа у 2,8 раза більша. Окрім малої довжини короткозамкнутого шлейфа, недолік традиційного резонатора ще й у низькому значенні характеристичного імпедансу шлейфів, що відповідає нижній межі значень для двовимірних мікросмушкових елементів. Завдяки відрізку в запропонованому резонаторі збільшено значення характеристичного імпедансу розімкнутого шлейфа, чим послаблено вимоги до параметрів шлейфа.

4 Обговорення отриманих результатів

Резонатор на основі розімкнутого та короткозамкнутого шлейфів має значні потенційні переваги, як порівняти з резонатором на основі розімкнутих шлейфів. Зазвичай коефіцієнти відбиття від відбивачів резонатора мають однакові фази. У цьому випадку мінімальна довжина резонатора дорівнює $\lambda_0/2$ (λ_0 — резонансна довжина хвилі). Такий розмір має резонатор на основі розімкнутих шлейфів. Розімкнутий та короткозамкнутий шлейфи як відбивачі — протифазні, тому довжина резонатора на їхній основі дорівнює $\lambda_0/4$. Окрім того, завдяки короткозамкнутому шлейфу немає відгуків на нульовій та подвоєній частотах. Однак, мала довжина короткозамкнутого шлейфа є суттєвим недоліком цього резонатора.

Запропоновані рішення дають змогу подолати вказаний недолік. Довжина й ширина резонатора, розглянутого на Рис. 5б, дорівнює $\lambda_0/4$, а довжина

короткозамкнутого шлейфа — $\lambda_0/16$ (у традиційного резонатора — $\lambda_0/43$).

Характеристики резонатора поліпшуються у разі збільшення перепаду характеристичних імпедансів шлейфів. Значне розширення діапазону імпедансів забезпечують тривимірні мікросмушкові елементи.

Висновки

Запропоновані рішення дають змогу збільшити довжину короткозамкнутого шлейфа, значення характеристичного імпедансу та добротності. Наукову новизну отриманих результатів становлять формули для розрахунку добротності резонатора, які дозволяють визначати його конструктивні параметри в першому наближенні. Практичне значення результатів — у забезпеченні можливості розробки резонатора на основі розімкнутого та короткозамкнутого шлейфів з довшим короткозамкнутим шлейфом та відрізком основної лінії передачі.

References

- [1] 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.
- [2] Rizzi A. P. (1988). *Microwave Engineering Passive Circuits*. Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, 640 p.
- [3] Pozar D. M. (2011). *Microwave Engineering, 4th ed.* N. Y., Wiley, 752 p.

- [4] Hong J.-S. (2011). *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, 2nd ed.* N. Y., Wiley, 656 p.
- [5] Joines W. T., Palmer W. D. and Bernhard G. T. (2013). *Microwave Transmission Line Circuits.* Norwood, MA., Artech House, 320 p.
- [6] Hosoya K., Tanaka S., Amamiya Y., Niwa T. and Shimawaki H. (1999). A low phase-noise 18-GHz HBT oscillator utilizing a $(\lambda/4 \pm \delta)$ open stubs resonator. *Asia Pacific Microwave Conference. APMC'99. Microwaves Enter the 21st Century. Conference Proceedings*, pp. 64-67. DOI: 10.1109/APMC.1999.828049.
- [7] 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.
- [8] Gómez-García R., Muñoz-Ferreras J.-M. and Psychogiou D. (2019). Dual-Behavior Resonator-Based Fully Reconfigurable Input Reflectionless Bandpass Filters. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 29, Iss. 1, pp. 35-37. DOI: 10.1109/LMWC.2018.2884151.
- [9] Zheng P., Peng Y. and Han X. (2019). Wideband Bandpass Filter with Controllable Bandwidth and High Selectivity Using Dual-Behavior Resonators and Coupled Lines. *IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, pp. 294-297. DOI: 10.1109/ICCC47050.2019.9064429.
- [10] Yang Z., Cheng J., Wang J., Shang H., and Gao Q. (2021). A DBR Microstrip Duplexer Based on Improved Microstrip Cross-Shaped Resonators. *2nd China International SAR Symposium (CISS)*, pp. 1-8. DOI: 10.23919/CISS51089.2021.9652311.
- [11] 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.
- [12] Sánchez-Soriano M. Á., Quéré Y., Saux V. Le, Marini S., Reglero M. S., Boria V. E. and Quendo C. (2019). Peak and Average Power Handling Capability of Microstrip Filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 67, Iss. 8, pp. 3436-3448. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2919509.
- [13] 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, 2021. DOI: 10.3390/electronics9122021.
- [14] Feng W., Shi Y., Ma X., Shen Y., Che W., Xue Q. and Wu L.-S. (2019). 28-GHz High-Selectivity Bandpass Filters with Dual-Behavior Resonators Using GaAs Technology. *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 47, Iss. 12, pp. 5277-5282. DOI: 10.1109/TPS.2019.2950708.
- [15] 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.
- [16] Qian Z.-Y. and Chen J.-X. (2019). Compact bandpass filter using CMRC-based dual-behavior resonator. *Int. J. RF Microw. Comput.-Aided Eng.*, Vol. 29, Iss. 7, e21719. DOI: 10.1002/mmce.21719.
- [17] Bidenko P. S., Nelin E. A., Nazarko A. I. and Adamenko Yu. F. (2015). Quasi-lumped reactive elements based on crystal-like discontinuities. *Radioelectronics and Communications Systems*, Vol. 58, Iss. 11, pp. 515-521. DOI: 10.3103/S0735272715110059.

Improving Parameters of Resonator on Open- and Short-Circuited Stubs

Nelin E. A., Nepochatykh Yu. V.

Introduction. Resonators are used for narrowband filtering and signal generation. Resonator on open-circuited stubs is widely used. Compared to this resonator, a resonator on open- and short-circuited stubs has the following advantages: twice as short; there are no responses at zero and doubled frequencies. However, due to a significant disadvantage — very small length of the short-circuited stub — such a resonator has not become widespread. The purpose of this article is to improve the design and electrical parameters of the resonator on open- and short-circuited stubs.

1 Conventional resonator on open- and short-circuited stubs. Features of the open-circuit stub equivalent capacitance and the transmission response (TR) of the resonator on open- and short-circuit stubs are considered. The equivalent capacitance frequency dependence leads to significant capacitance increasing at resonance. As a result, a high quality factor is achieved. However, such capacitance corresponds to a small inductance and, accordingly, unacceptably small length of the short-circuited stub. The disadvantage of the conventional resonator is also the low value of the stub characteristic impedance.

2 Resonator with increased length of short-circuited stub. In the article it is proposed two design decisions to overcome these disadvantages. It is shown that in contrast to the conventional decision with the same stub impedances, in the case of different impedance stubs — high-impedance open- and low-impedance short-circuited — the short-circuited stub is noticeably longer. The TR of two variants — 1 and 2 — resonator on different impedance stubs is given. The variants differ in the stub characteristic impedances values: variant 1 satisfy values for two-dimensional microstrip elements, and variant 2 — three-dimensional. The variant 2 has longer short-circuited stub and higher signal suppression in the suppression bands. Compared to the conventional decision, the length of the short-circuited stub in the variants 1 and 2 is 2.2 and 3.2 times longer.

3 Resonator with transmission line section. The second of the proposed decisions is the introduction into the resonator design the section of main transmission line. It is shown that in the case of a high-impedance section the resonator quality factor increases. The resonator TR with quarter wavelength and half wavelength sections, which increase the quality factor by 3 and 4 times, is compared with the case without sections.

4 Results discussion. The proposed decisions make it possible to overcome disadvantages of the conventional resonator. The resonator based on these decisions has a length and width of $\lambda_0/4$ (λ_0 — resonant wavelength), the length of the short-circuited stub of $\lambda_0/16$ (in the conventional design — $\lambda_0/43$).

Resonator characteristics are improved in the case of range extension of the stubs characteristic impedances. For microstrip resonator design a significant impedances range extension is provided by three-dimensional elements.

Conclusion. The proposed decisions make it possible to improve the design and electrical parameters of the resonator on open and short-circuited stubs by increasing

the length of the short-circuited stub, stubs characteristic impedances and quality factor.

The obtained quality factor formulas allow defining the resonator design parameters in the first approximation.

Keywords: resonator, transmission line, open-circuited stub, short-circuited stub