

УДК 621.372.22

Підвищення добротності двошлейфного резонатора

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 підвищення добротності двошлейфного резонатора. Більш висока добротність забезпечує поліпшення конструктивних і електричних параметрів пристроїв на основі резонатора. Традиційний шлейф двошлейфного резонатора — односекційний, утворений відрізком лінії передачі. Оскільки добротність прямо пропорційна крутості частотної залежності реактивної провідності резонатора, інше конструктивне рішення шлейфа має забезпечувати більш високу крутість частотної залежності його реактивної провідності. Проаналізовано умови порівняння реактивних характеристик шлейфів. Показано, що за заданого рівня відгуку в смугах подавлення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) резонатора у шлейфів, реактивні характеристики яких порівнюються, мають бути однакові ємності в області низьких частот. Наведено частотні залежності реактивної провідності розімкнутих дво- та односекційного шлейфів. Двосекційний шлейф складається з двох відрізків лінії передачі з різними параметрами. Крутість залежності для двосекційного шлейфа вища, що дає змогу підвищити добротність резонатора. Підвищення крутості зростає з частотою і зі збільшенням відношення довжин одно- та двосекційного шлейфів та досягає 23%. Наведено АЧХ резонаторів з розімкнутими дво- та односекційними шлейфами за заданих параметрів АЧХ. Резонатор з двосекційними шлейфами має на 15% більшу добротність і вдвічі меншу довжину. Розглянуто резонатор з розімкнутим двосекційним і короткозамкнутим односекційним шлейфами. В АЧХ такого резонатора немає відгуків на нульовій та подвоєній частотах, але гірша крутість з боку нижніх частот і лише один нуль. Довжина резонатора в 1,8 раза менша проти резонатора з розімкнутими шлейфами. Наведено конструктивні та електричні параметри розглянутих варіантів двошлейфного резонатора. Запропоноване рішення підвищення добротності можна використати в резонаторах різної конструктивної реалізації (мікросмугової, коаксильної та ін.). Розвитком представленого дослідження є розгляд формування смугової характеристики такими резонаторами.

Ключові слова: резонатор; лінія передачі; розімкнутий шлейф; короткозамкнутий шлейф

DOI: [10.20535/RADAP.2023.94.58-63](https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.94.58-63)

Вступ

Вузкосмугові фільтри та осцилятори на основі резонаторів, зокрема мікросмугових, використовують у радіолокації, бездротовому й мобільному зв'язку, випробувальній та вимірвальній апаратурі. Резонатор є базовою структурою смугового фільтра. Відомі різні конструкції резонаторів на основі реактивних елементів з зосередженими, квазізосередженими та розподіленими параметрами [1–3]. Широко застосовують резонансні структури на основі шлейфів лінії передачі.

Двошлейфна структура, утворена розімкнутим та короткозамкнутим шлейфами як квазізосередженими елементами, аналогічна паралельному коливальному контуру. Довжина шлейфа менша за $\lambda_0/10$, де λ_0 — резонансна довжина хвилі. Такий контур має низьку добротність. Висока добротність у розподілених резонаторів на основі двох розімкну-

тих або розімкнутого й короткозамкнутого шлейфів [2]. Довжини резонаторів дорівнюють $\lambda_0/2$ і $\lambda_0/4$ відповідно. Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) резонатора з розімкнутими шлейфами має високу крутість та нулі поблизу смуги пропускання. Такий резонатор є базовим для смугових фільтрів [4–8].

Традиційний шлейф двошлейфного резонатора — односекційний, утворений відрізком лінії передачі. Двосекційний шлейф складається з двох відрізків з різними параметрами. Розімкнутий двосекційний шлейф у квазізосередженому наближенні є послідовним коливальним контуром. Такі шлейфи використовують для формування нулів АЧХ фільтрів [1]. Значний розвиток має короткозамкнутий двосекційний шлейф з паралельними резонансами [3]. За певних співвідношень параметрів двосекційний шлейф коротший за односекційний.

Ключовий параметр резонатора — добротність. Підвищення добротності резонатора є актуальним для поліпшення конструктивних і електричних параметрів пристроїв на його основі. Добротність прямо пропорційна крутості частотної залежності реактивної провідності резонатора. В останні роки запропоновано нові конструктивні рішення підвищення добротності мікрохвильових резонаторів [9–12].

У представленій статті розглянуто підвищення добротності двошлейфного резонатора. Як показано в статті, за однакових умов розімкнутий дво-секційний шлейф має більш круту частотну залежність реактивної провідності ніж односекційний. Це дає змогу підвищити добротність двошлейфного резонатора. Для моделювання використано модель лінії передачі без втрат. Характеристичні і вхідні опори і провідності нормовано до характеристичного опору і провідності лінії передачі відповідно, а довжини елементів — до λ_0 .

1 Умови порівняння характеристик шлейфів

На Рис. 1а наведено двошлейфний резонатор, утворений двома односекційними шлейфами — розімкнутими або розімкнутим і короткозамкнутим. Закоротку показано штриховою лінією. Довжини розімкнутих шлейфів близькі до резонансної довжини чвертьхвильового шлейфа $l = 0,25$, а довжина короткозамкнутого — набагато менша.

Рисунок 1б ілюструє АЧХ резонатора на основі розімкнутих шлейфів. Параметри наведено в Табл. 1, де $l_{I, II}$ — довжини шлейфів I і II; α — параметр, що дорівнює відстані від резонансної частоти до частот нулів АЧХ (у нормованих частотах F); $z_{I, II}$ — характеристичні опори шлейфів I і II; Q — добротність.

Табл. 1

l_I	l_{II}	α	z_I	z_{II}	Q
$(1+\alpha)^{-1}l$	$(1-\alpha)^{-1}l$	0,1	0,49	0,40	73

За лінійного наближення частотної залежності реактивної провідності резонатора в смузі пропускання добротність визначає відома формула

$$Q = \frac{1}{2G} \left. \frac{dB}{dF} \right|_{F=1}, \quad (1)$$

де G і B — активна й реактивна провідності резонатора; $G=2$; $B=b_I+b_{II}$. Відповідно до еквівалентної схеми на Рис. 1а АЧХ резонатора дорівнює

$$H = \frac{1}{\sqrt{1 + (B/G)^2}}. \quad (2)$$

Як бачимо з (1) і (2), як добротність, так і рівень відгуку у смугах подавлення резонатора визначає частотна залежність реактивності B .

Провідність розімкнутого односекційного шлейфа дорівнює

$$b = z^{-1} \operatorname{tg} k l, \quad (3)$$

де z — характеристичний опір шлейфа; $k = 2\pi F$. За умови $kl < \pi/2$ провідність шлейфа має ємнісний характер. Еквівалентну ємність шлейфа визначає співвідношення

$$C = C_0 \frac{\operatorname{tg} k l}{k l}, \quad C_0 = \frac{l}{z Z_0 f_0}, \quad (4)$$

де C_0 — ємність на низьких частотах (за умови $\operatorname{tg} k l \approx k l$); Z_0 — характеристичний опір лінії передачі. Оскільки $\operatorname{tg}(\pi - x) = -\operatorname{tg}(x)$, можна зробити висновок, що ємність C_0 визначає рівень відгуку як у нижньочастотній, так і у верхньочастотній смузі подавлення.

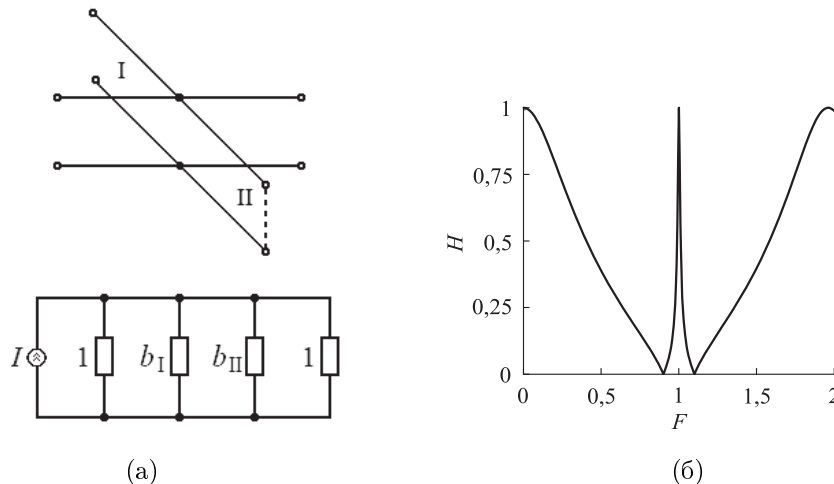


Рис. 1. Двошлейфний резонатор і його еквівалентна схема (а) та АЧХ резонатора (б); I і II — шлейфи, $b_{I, II}$ — провідності, що відповідають вхідним провідностям шлейфів $ib_{I, II}$, $i = \sqrt{-1}$, I — джерело струму, 1 — провідності джерела та навантаги, $F = f/f_0$, f і f_0 — поточна й резонансна частоти

Отже, за заданих параметрів АЧХ резонатора (рівня відгуку в смугах подавлення та нулів) ємності C_0 шлейфів, характеристики яких порівнюються, мають бути однаковими.

2 Порівняння реактивних характеристик розімкнутих двота односекційного шлейфів

Рисунок 2 ілюструє розімкнутий двосекційний шлейф. Послідовність номерів секцій така ж, як і для короткозамкнутого двосекційного шлейфа, детально проаналізованого в [3].

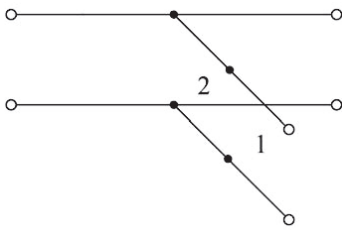


Рис. 2. Розімкнутий двосекційний шлейф;
1 і 2 — секції шлейфа

Аналогічно [3] провідність розімкнутого двосекційного шлейфа дорівнює

$$b = \frac{z_1^{-1}t_1 + z_2^{-1}t_2}{1 - \eta t_1 t_2}, \quad (5)$$

де $t_{1,2} = \operatorname{tg}kl_{1,2}$; $\eta = z_2/z_1$, $l_{1,2}$ і $z_{1,2}$ — відповідно довжини й характеристичні опори секцій, індекси відповідають номерам секцій. На відміну від короткозамкнутого шлейфа вираз (5) — протилежного знаку, обернений, з оберненими $z_{1,2}$.

За заданої резонансної частоти розімкнутий двосекційний шлейф, як і короткозамкнутий, має мінімальну довжину (оптимальний шлейф), якщо $l_1 = l_2$, але з протилежним співвідношенням $\eta > 1$. Довжина двосекційного шлейфа менша ніж односекційного.

Як бачимо з (5), частоти послідовних резонансів шлейфа визначає умова $\eta t_1 t_2 = 1$. Для оптимального шлейфа, який розглядатимемо далі,

$$\eta = \operatorname{tg}^{-2}2\pi l_1. \quad (6)$$

Прийmemo, що опори z_2 та z_1 взаємообернені: $z_2 = z_1^{-1}$. У цьому випадку з (5) і (6) отримаємо

$$b = \frac{z_+ t_1}{1 - z_1^{-2} t_1^2}, \quad (7)$$

$$z_1 = \operatorname{tg}2\pi l_1, \quad (8)$$

де $z_+ = z_1 + z_1^{-1}$.

Ємність C_0 двосекційного шлейфа дорівнює сумі ємностей його секцій. Оскільки ємність секції відповідає (4), для двосекційного шлейфа маємо

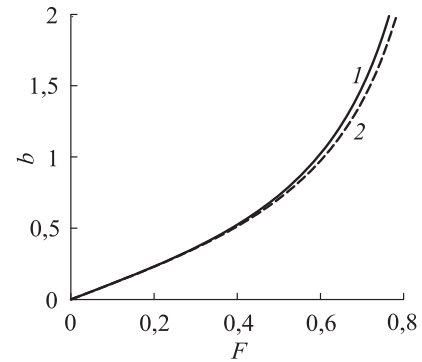
$$C_0 = \frac{l_1 z_+}{Z_0 f_0}. \quad (9)$$

З рівності (4) і (9) отримаємо

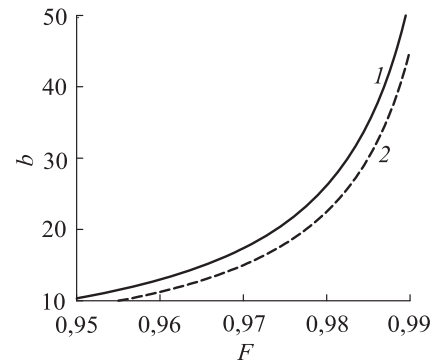
$$z = \frac{2m}{z_+}, \quad (10)$$

де $m = l/2l_1$ — відношення довжин одно- і двосекційного шлейфів. Значення m визначає параметри обох шлейфів.

На Рис. 3 наведено реактивні характеристики згідно з (3), (7), (8) і (10). На нижніх частотах криві збігаються, що відповідає однаковим ємностям, а на верхніх — характеристика двосекційного шлейфа більш крута.



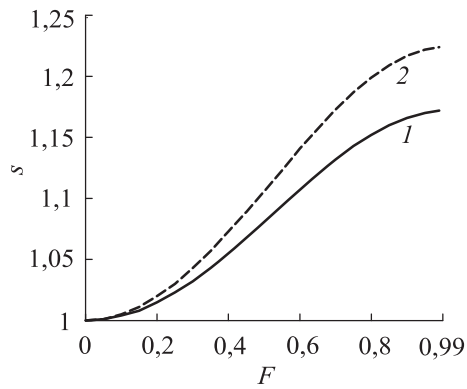
(а)



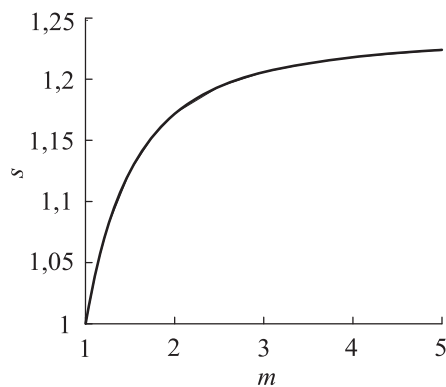
(б)

Рис. 3. Реактивні характеристики двосекційного (1) та односекційного (2) шлейфів до резонансу (а) і поблизу резонансу (б); $m = 2$

Рисунок 4 ілюструє залежності відношення похідних реактивних характеристик шлейфів, позначене як s . Значення s зростає з частотою та зі збільшенням m . За $m = 5$ збільшення крутості досягає 22%. Зі збільшенням m двосекційний шлейф наближається до послідовного контура. Відношення похідних реактивних характеристик послідовного контура та односекційного шлейфа за умови $F \rightarrow 1$ дорівнює $\pi^2/8 = 1,23$, що визначає максимальне значення s .



(a)



(б)

Рис. 4. Залежності відношення похідних реактивних характеристик двосекційного та односекційного шлейфів — частотні (а) та від відношення довжин шлейфів на частоті $F=0,99$ (б); $m=2$ (1), $m=5$ (2)

3 Резонатор на основі розімкнутих двосекційних шлейфів

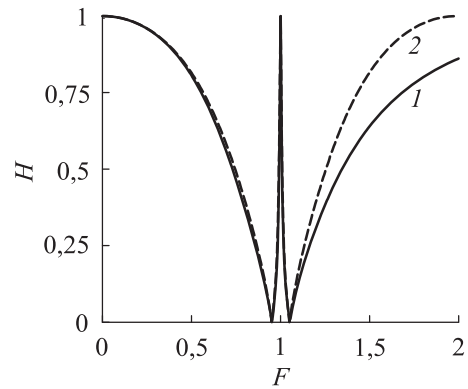
На Рис. 5 наведено АЧХ резонаторів на основі розімкнутих шлейфів: двосекційних (резонатор 1) і, для порівняння, односекційних (резонатор 2). Резонатори мають однакові ємності й однакові частоти нулів АЧХ. Параметри резонаторів наведено в Табл. 2, де подвійним індексом позначено номери

Табл. 2

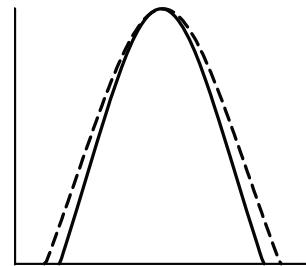
№	$l_{I1}, l_{I2}; l_I$	$l_{II1}, l_{II2}; l_{II}$	α	l_{Σ}	$z_{I1}, z_{I2}; z_I$	$z_{II1}, z_{II2}; z_{II}$	Q
1	$0,25l$	$0,25l$	-	l	0,44 2,29	0,39 2,54	104,4
2	$(1+\alpha)^{-1}l$	$(1-\alpha)^{-1}l$	0,05	$2l$	1,49	1,35	90,6
3	$0,25l$	$0,06l$	-	$0,56l$	0,39 2,09	0,68	104,9

двосекційного шлейфа і його секції; l_{Σ} — сумарна довжина резонатора. Довжини секцій шлейфів резонатора 1 однакові.

Добротність резонатора 1 на 15% більша, а довжина вдвічі менша.



(a)



(б)

Рис. 5. Амплітудно-частотні характеристики резонатора 1 (1) та резонатора 2 (2) (а); у смугі пропускання і в області нулів АЧХ (б)

4 Резонатор на основі розімкнутого та короткозамкнутого шлейфів

Резонатор з розімкнутими шлейфами має відгуки на нульовій та подвоєній частотах. Якщо один зі шлейфів короткозамкнутий, ці відгуки подавлені. Крім того, довжина резонатора вдвічі менша. Мала довжина короткозамкнутого шлейфа ускладнює його конструктивне виконання. Для збільшення довжини шлейф має бути низькоімпедансним і односекційним.

На Рис. 6 наведено АЧХ резонатора на основі розімкнутого двосекційного та короткозамкнутого односекційного шлейфів. Параметри резонатора представлено в Табл. 2 (резонатор 3). Для порівняння зображено АЧХ резонатора 1.

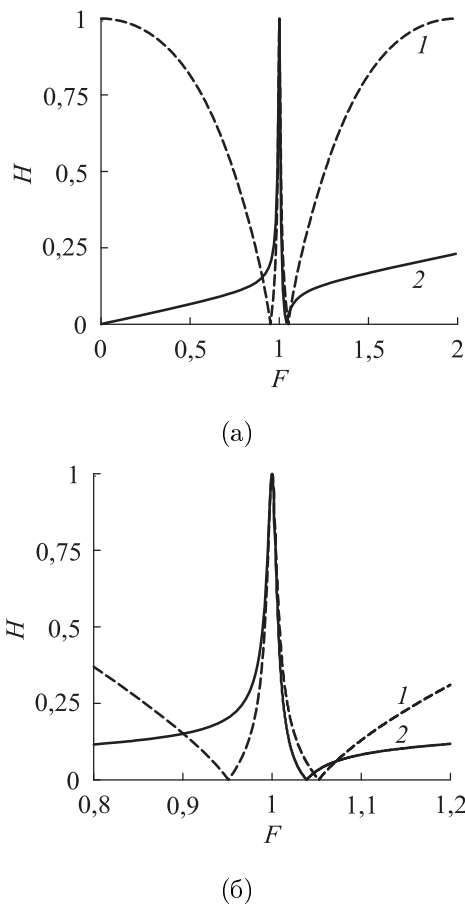


Рис. 6. Амплітудно-частотні характеристики резонатора 1 (1) та резонатора 3 (2) у широкому (а) та вузькому (б) діапазоні частот

В АЧХ резонатора 3 немає відгуків на нульовій та подвоєній частотах, але гірша крутість з боку нижніх частот і лише один нуль. У резонаторі спостерігається резонанс Фано, про що свідчить форма АЧХ. Добротності резонаторів 3 і 1 майже збігаються, а довжина резонатора 3 в 1,8 раза менша.

5 Обговорення отриманих результатів

Частотну залежність реактивної провідності розімкнутого односекційного шлейфа визначає функція $\operatorname{tg}(\pi F/2)$. Висока добротність традиційного двошлейфного резонатора з односекційними шлейфами зумовлена крутістю функції $\operatorname{tg}(\pi F/2)$ поблизу резонансу шлейфа. Крутість реактивної провідності двосекційного шлейфа більш висока, що дає змогу підвищити добротність двошлейфного резонатора.

Двошлейфний резонатор з односекційними шлейфами — півхвильовий. Довжина двошлейфного резонатора з двосекційними шлейфами значно менша. Добротність цього резонатора підвищується зі зменшенням довжини, оскільки зі зменшенням довжини шлейфа зростає крутість його реактивної провідності. Обмеженнями є мінімально прийнятна довжина секції шлейфа та максимально прийнятний перепад характеристик опорів секцій, що збільшується в разі зменшення довжини.

Запропоноване рішення підвищення добротності можна використати в резонаторах різної конструктивної реалізації (мікросмужкової, коаксимальної та ін.).

Висновки

Частотна залежність реактивної провідності розімкнутого двосекційного шлейфа має більшу крутість проти розімкнутого односекційного шлейфа. Підвищення крутості досягає 23%.

За заданих параметрів АЧХ розглянутий резонатор із розімкнутими двосекційними шлейфами має на 15% вищу добротність і вдвічі меншу довжину. Виконання одного зі шлейфів резонатора короткозамкнутим дає змогу розширити смуги подавлення.

Розвитком представленого дослідження є розгляд формування смужової характеристики запропонованими резонаторами.

References

- [1] Hong J.-S. (2011). *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, 2nd ed.* N. Y., Wiley, 656 p.
- [2] Joines W. T., Palmer W. D. and Bernhard G. T. (2013). *Microwave Transmission Line Circuits.* Norwood, MA, Artech House, 320 p.
- [3] Makimoto M. and Yamashita S. (2001). *Microwave Resonators and Filters for Wireless Communication: Theory, Design and Application.* Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 162 p. DOI: 10.1007/978-3-662-04325-7.
- [4] 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.

- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Raguénès C., Fourn E., Quendo C., Allanic R. and Le Berre D. (2022). Application of chalcogenide glass to DBR filter reconfiguration. *Journées Nationales Microondes*, Li-moges, France, hal-03986677.
- [9] Johnson L., Bouazzaoui H., Meyer E., Meyer P., Potelon B., Quendo C. and Allanic R. (2022). Novel High-Q Partially Air-Filled Pedestal Resonator and Filter Integrated in a Printed Circuit Board (PCB). *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 10160–101167. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3208351.
- [10] Nisamol T. A., Abdulla P. and Rekha T. K. (2022). Modified Inverted Microstrip Integrated Filter. *2022 11th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)*, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MOCASST54814.2022.9837743.
- [11] Wu W.-J. and Zhao W.-S. (2022). A Quality Factor Enhanced Microwave Sensor Based on Modified Split-Ring Resonator for Microfluidic Applications. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 22, Iss. 23, pp. 22582–22590. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3215149.
- [12] Manzoor Z., Sinanis M. D., Mkhitarian V., Yesilyurt O., Kildishev A. V. and Peroulis D. (2022). A Miniaturized X-band High-Index Supercavity Resonator in Microstrip Technology. *2022 52nd European Microwave Conference (EuMC)*, pp. 568–571. DOI: 10.23919/EuMC54642.2022.9924352.

Increasing Quality Factor of Two-Stub Resonator

Nelin E. A., Nepchatykh Yu. V.

Introduction. Narrowband filters and oscillators based on resonators are used in radiolocation, wireless and mobile communications, testing and measuring equipment. Coupled resonators form a bandpass characteristic. Resonance structures based on transmission line stubs are widely used, in particular, a two-stub resonator with open-circuited stubs. The advantages of such a resonator are a high steepness of the transmission response and the presence of zeros near the passband. The purpose of this paper is to increase two-stub resonator quality

factor by replacing conventional open-circuited one-section stubs with two-section ones.

1 Conditions for comparing the characteristics of stubs. The frequency dependence of the resonator's reactive conductivity determines both the quality factor and the level in the resonator's suppression bands. It is shown that at a given level in the suppression bands, one-section and two-section stubs should have the same low-frequency capacities.

2 Comparison of reactive characteristics of open-circuited two-section and one-section stubs. The frequency dependences of reactive conductivity of open-circuited two-section and one-section stubs are given. The steepness of the reactive conductivity of the two-section stub is higher, which makes it possible to increase the quality factor of the two-stub resonator. Rise in steepness increases with the decrease in the length of the two-section stub and reaches 23%. The two-section stub is shorter than the one-section stub.

3 Resonator based on open-circuited two-section stubs. The transmission response of a two-stub resonator with open-circuited two-section stubs is presented. The resonator has a 15% higher quality factor and half the length compared to a resonator with one-section stubs.

4 Resonator based on open- and short-circuited stubs. The transmission response of a two-stub resonator with open-circuited two-section and short-circuited one-section stubs is given. In such a resonator, there are no parasitic responses at zero and doubled frequencies. The disadvantages are the short length of the short-circuited stub (which complicates its constructive implementation), the worse steepness of frequency response on the side of lower frequencies and only one zero.

5 Results discussion. A two-stub resonator with one-section stubs is half-wave. The length of the two-stub resonator with two-section stubs is much shorter. The quality factor of this resonator increases with decreasing length, since the steepness of its reactive conductivity increases with decreasing stub length. The limitations are the minimum acceptable length of the stub section and the maximum acceptable difference in the characteristic impedances of the sections, which increases as the length decreases.

Conclusion. The frequency dependence of the reactive conductance of an open two-section stub has a steeper slope compared to an open one-section stub. Increase in steepness reaches 23%.

Given the frequency response parameters, the considered resonator with open-circuited two-section stubs has a 15% higher quality factor and half the length. Making one of the resonator stubs short-circuited allows you to expand the suppression bands.

The development of the research is the consideration of the formation of the bandpass characteristic by the proposed resonators.

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