

УДК 621.372.543

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ВАРИКАПАМИ УЗКОПОЛОСНЫЕ ФИЛЬТРЫ С РАСШИРЕННОЙ ПОЛОСОЙ ЗАГРАЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ П-ОБРАЗНЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

А. В. ЗАХАРОВ, М. Е. ИЛЬЧЕНКО

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,
Украина, Киев, 03056, пр-т Победы 37*

Аннотация. Получено уравнение резонанса для первой паразитной резонансной частоты перестраиваемого микроволнового П-образного резонатора петлевого типа с переменной емкостью. Эта частота не зависит от величины переменной емкости, пропорциональна колебаниям типа λ и является неизменной. Установленная особенность позволяет определить отношение первой паразитной резонансной частоты к частоте основного резонанса и контролировать ширину полосы заграждения перестраиваемых фильтров с П-образными резонаторами. Проведено построение и приведены экспериментальные данные узкополосного (2%) перестраиваемого варикапами фильтра, который обладает расширенной полосой заграждения. Экспериментальный четырехрезонаторный фильтр перестраивался в диапазоне частот 225–400 МГц. Полоса заграждения фильтра по уровню затухания –40 дБ располагалась в области частот 420–1290 МГц, т. е. $f_{\max}/f_{\min} = 3,07$. Показана перспективность практического использования перестраиваемых варикапами фильтров с микрополосковыми П-образными резонаторами.

Ключевые слова: перестраиваемый фильтр; П-образный резонатор; варикап; диапазон перестройки; полоса заграждения

ВВЕДЕНИЕ

Электрически перестраиваемые полосно-пропускающие фильтры играют значительную роль в современных системах беспроводной связи, о чем свидетельствуют обзорные статьи [1, 2]. Большинство этих фильтров содержат резонаторы из отрезков линий передачи и конденсаторы переменной емкости, как элементы перестройки. В качестве конденсаторов используются полупроводниковые варикапы [3–5], сегнетоэлектрические конденсаторы [6–9], наборы сосредоточенных емкостей, коммутируемых MEMS переключателями [10–13] или *pin*-диодами [14].

В первых двух типах фильтров осуществляется непрерывное изменение частоты. Во вторых двух типах фильтров используется дискретное изменение частоты, эти фильтры также называются фильтрами с «прыгающей» частотой (*hopping filters*). Предпринятые усилия привели к созданию перестраиваемых фильтров с высоким уровнем характеристик и их последующему серийному выпуску.

Следует отметить двухрезонаторные фильтры серии *Maxi-Pole* на коаксиальных резонаторах, перестраиваемые *pin*-диодами, которые выпускаются компанией *Pole-Zero* [14]. Эти фильтры имеют наиболее узкую полосу пропускания (2%) с минимальными потерями в полосе 4–5 дБ. Уменьшение ширины полосы

DOI: [10.20535/S0021347017090011](https://doi.org/10.20535/S0021347017090011)

© А. В. Захаров, М. Е. Ильченко, 2017

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wong, P. W.; Hunter, I. Electronically tunable filters. *IEEE Microwave Mag.*, Vol. 10, No. 6, P. 46–54, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/MMM.2009.933593>.
2. Hong, J.-S. Reconfigurable planar filters. *IEEE Microwave Mag.*, Vol. 10, No. 6, P. 73–83, 2009. DOI: [10.1109/MMM.2009.933590](https://doi.org/10.1109/MMM.2009.933590).
3. Brown, A. R.; Rebeiz, G. M. A varactor-tuned RF filter. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 48, No. 7, P. 1157–1160, 2000. DOI: [10.1109/22.848501](https://doi.org/10.1109/22.848501).
4. Kapilevich, B. A varactor-tuned filter with constant bandwidth and loss compensation. *Microwave J.*, No. 4, P. 106–114, 2007. URI: <http://www.microwavejournal.com/articles/4575>.
5. Захаров, А. В.; Ильченко, М. Е. Новый подход к построению фильтров, перестраиваемых варикапами. *Радиотехника и электроника*, Т. 55, № 12, С.

1523–1532, 2010. URI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15524126>.

6. Sigman, J.; Nordquist, C. D.; Clem, P. G.; Kraus, G. M.; Finnegan, P. S. Voltage-controlled Ku-band and X-band tunable combline filters using barium-strontium-titanate. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, Vol. 18, No. 9, P. 593–595, 2008. DOI: [10.1109/LMWC.2008.2002453](https://doi.org/10.1109/LMWC.2008.2002453).

7. Nath, J.; Ghosh, D.; Maria, J.-P.; Kingon, A. I.; Fathelbab, W.; Franzon, P. D.; Steer, M. B. An electronically tunable microstrip bandpass filter using thin-film Barium-Strontium-Titanate (BST) varactors. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 53, No. 9, P. 2707–2712, 2005. DOI: [10.1109/TMTT.2005.854196](https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.854196).

8. Захаров, А.В.; Ильченко, М.Е.; Карнаух, В.Я.; Пинчук, Л.С. Перестраиваемые микрополосковые резонаторы с сегнетоэлектрическими конденсаторами. *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 53, № 8, С. 30–35, 2010. URI: <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347010080042>.

9. Захаров, А.В.; Ильченко, М.Е.; Карнаух, В.Я.; Пинчук, Л.С. Добротность сегнетоэлектрических конденсаторов, используемых в перестраиваемых фильтрах сверхвысоких частот. *Радиотехника и электроника*, Т. 56, № 8, С. 1017–1022, 2011. URI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16552921>.

10. Chan, K. Y.; Fouladi, S.; Ramer, R.; Mansour, R. R. RF MEMS switchable interdigital bandpass filter. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, Vol. 22, No. 1, P. 44–46, 2012. DOI: [10.1109/LMWC.2011.2176926](https://doi.org/10.1109/LMWC.2011.2176926).

11. Liu, X.; Katehi, L. P. B.; Chappell, W. J.; Peroulis, D. Power handling of electrostatic MEMS evanescent-mode (EVA) tunable bandpass filters. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 60, No. 2, P. 270–283, 2012. DOI: [10.1109/TMTT.2011.2176136](https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2176136).

12. Huang, F.; Fouladi, S.; Mansour, R. R. High-Q tunable dielectric resonator filters using MEMS

technology. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 59, No. 12, P. 3401–3409, 2011. DOI: [10.1109/TMTT.2011.2171984](https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2171984).

13. Sekar, V.; Armendariz, M.; Entesari, K. A 1.2–1.6-GHz substrate-integrated-waveguide RF MEMS tunable filter. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 59, No. 4, P. 866–876, 2011. DOI: [10.1109/TMTT.2011.2109006](https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2109006).

14. <http://www.dovermpg.com/polezero>.

15. Makimoto, M.; Yamashita, S. *Microwave Resonators and Filters for Wireless Communication*. Springer, 2001. DOI: [10.1007/978-3-662-04325-7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04325-7).

16. Hong, J.-S. *Microstrip Filters for RF/Microwave Application*, 2nd ed. New York: Wiley, 2011.

17. Гиллемин, Э.А. *Синтез пассивных цепей* : пер. с англ. М.: Связь, 1970. 720 с.

18. Маттей, Г.Л.; Янг, Л.; Джонс, Е.М.Т. *Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи*, Т. 2 : пер. с англ. М.: Связь, 1972.

19. Захаров, А.В.; Ильченко, М.Е.; Пинчук, Л.С. Микрополосковые П-образные резонаторы. *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 55, № 8, С. 38–48, 2012. URI: <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347012080043>.

20. Захаров, А.В. Добротность резонаторов из отрезков линий передачи, перестраиваемых конденсатором. *Радиотехника и электроника*, Т. 56, № 5, С. 646–654, 2011. URI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16352674>.

21. Захаров, А.В.; Розенко, С.А. Дуплексер на основе микрополосковых фильтров, использующих подложки с высокой диэлектрической проницаемостью. *Радиотехника и электроника*, Т. 57, № 6, С. 713–720, 2012. URI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17726257>.

Поступила в редакцию 09.11.2016