

## **Ефекти електромагнітної взаємодії в мікрохвильових багатоярусних планарних структурах та розвиток теорії фільтрів для засобів телекомунікацій**

## **Эффекты электромагнитного взаимодействия в микроволновых многоярусных планарных структурах и развитие теории фильтров для средств телекоммуникаций**

## **Effects of electromagnetic interaction in microwave multipleplaced planar structures and development of the theory of filters for telecommunication system**

**1. Номер державної реєстрації: 0116U003764**

**2. Науковий керівник** Захаров О.В., д.т.н., с.н.с., Захаров А.В., Zakharov A.V.

**3. Суть розробки, основні результати**

**(укр.)**

Розроблена теорія для багатоярусних смуго-пропускаючих фільтрів планарної конструкції, її положення підтверджені вимірами на діючих експериментальних зразках. На основі встановлених теоретичних положень створено нові схемотехнічні рішення смуго-пропускаючих фільтрів з різноманітними частотними характеристиками, що відображено в матеріалах патентів. Встановлено, що трирезонаторні фільтри зі змішаним перехресним зв'язком  $K_{13} = K_m + K_e$ , що дорівнює нулю ( $K_{13} = 0$ ), мають два еквідистантно розташовані полюси загасання або постійний час затримки. Ця закономірність складає основу побудови багаторівневих фільтрів. Створено методики побудови двоярусних смуго-пропускаючих фільтрів з різноманітними частотними характеристиками, які не використовують низькочастотні прототипи, а дозволяють безпосередньо обчислити схемні елементи. Запропоновано і проаналізовано нові конструкції планарних смуго-пропускаючих трирезонаторних фільтрів з перехресним зв'язком, які характеризуються великим різноманіттям реалізованих частотних характеристик. Поряд з підвищеною односторонньою вибірковістю, вони можуть мати симетричну АЧХ з полюсом загасання, розташованим праворуч і ліворуч від смуги пропускання. Основу фільтрів складають пари близько розташованих один до одного східчасто-імпедансних резонаторів, електромагнітний зв'язок між якими може носити як ємнісний, так і індуктивний характер. Встановлено, що характер включення середнього резонатора в схему трирезонаторного фільтра з перехресним зв'язком призводить до істотних відмінностей в АЧХ. В процесі аналізу отримані кількісні показники коефіцієнтів зв'язку двоярусних планарних фільтрів, мікросмужкових та смужкових, з різними діелектричними сталими, та з резонаторами різних конфігурацій. Це дозволяє проектувати фільтри в різних частотних діапазонах і з різними технічними вимогами.

**(рос.)**

Разработана теория для многоярусных полосно-пропускающих фильтров планарной конструкции, ее положения подтверждены измерениями на действующих экспериментальных образцах. На основе установленных теоретических положений созданы новые схемотехнические решения полосно-пропускающих фильтров с различными частотными характеристиками, что отражено в материалах патентов. Установлено, что трехрезонаторные фильтры со смешанной перекрестной связью  $K_{13} = K_m + K_e$ , равной нулю ( $K_{13} = 0$ ), имеют два эквидистантно расположенные полюса затухания или постоянное время задержки. Эта закономерность составляет основу построения многоуровневых фильтров. Созданы методики построения двухъярусных полосно-пропускающих фильтров с различными частотными характеристиками, которые не используют низкочастотные прототипы, а позволяют непосредственно вычислить схемные элементы. Предложены и проанализированы новые конструкции планарных полосно-пропускающих трехрезонаторных фильтров с перекрестной связью, которые характеризуются большим многообразием реализованных частотных характеристик. Наряду с повышенной односторонней избирательностью, они могут иметь симметричную АЧХ с полюсом затухания, расположенным справа и слева от полосы пропускания. Основу фильтров составляют пары близко расположенных друг к другу ступенчато-импедансных резонаторов, электромагнитная связь между которыми может носить

как емкостный, так и индуктивный характер. Установлено, что характер включения среднего резонатора в схему трехрезонаторного фильтра с перекрестной связью приводит к существенным различиям в АЧХ. В процессе анализа получены количественные показатели коэффициентов связи двухъярусных планарных фильтров, микрополосковых и полосковых с различными диэлектрическими постоянными, и с резонаторами различных конфигураций. Это позволяет проектировать фильтры в различных частотных диапазонах и с разными техническими требованиями.

(англ.)

A theory has been developed for multi-tiered bandpass filters of a planar structure, its position is confirmed by measurements on existing experimental samples. On the basis of the established theoretical positions, new circuit design solutions for bandpass filters with different frequency characteristics have been created, which is reflected in the patent materials. It is established that three-resonator filters with a mixed cross-coupling  $K_{13} = K_m + K_e$ , equal to zero ( $K_{13} = 0$ ), have two equidistantly located damping poles or a constant delay time. This pattern is the basis for building multi-level filters. Created methods for constructing a two-tier bandpass filters with different frequency characteristics, which do not use low-frequency prototypes, and allow you to directly calculate the circuit elements. New designs of planar band-passing three-resonator filters with cross-coupling, which are characterized by a large variety of implemented frequency characteristics, are proposed and analyzed. Along with increased one-sided selectivity, they may have a symmetrical frequency response with a damping pole located to the right and left of the passband. The filters are based on pairs of closely-spaced impedance resonators, the electromagnetic coupling between which can be both capacitive and inductive in nature. It is established that the nature of the inclusion of an average resonator in the scheme of a three-cavity cross-coupled filter leads to significant differences in the frequency response. In the course of the analysis, quantitative indicators of the coupling coefficients of two-tier planar filters, microstrip and stripline with different dielectric constants, and with resonators of various configurations were obtained. This allows you to design filters in different frequency ranges and with different technical requirements.

#### **4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.**

- Патент на корисну модель «Двоярусний планарний фільтр», № 107402, опубл.

10.06.2016 бюл. № 11/2016. Автори О.В. Захаров, М.Ю. Ільченко, І.В. Трубаров, Л.С. Пінчук.

- Патент на корисну модель «Двоярусний планарний фільтр», № 113948, опубл. 27.02.2017 бюл. № 4. Автори О.В. Захаров, М.Ю. Ільченко, С.О. Розенко, Л.С. Пінчук.

- Патент на корисну модель „Смужковий смуго-пропускаючий гребінчастий фільтр”. № 113949, опубл. 27.02.2017 бюл. № 4. Автори О.В. Захаров, М.Ю. Ільченко, С.О. Розенко, Л.С. Пінчук.

- Патент на корисну модель «Мікросмужковий фільтр». № 125314, опубл. 10.05.2018 бюл. № 9. Автори О.В. Захаров, М.Ю. Ільченко, С.О. Розенко, Л.С. Пінчук.

- Патент на корисну модель «Мікросмужковий гребінчастий фільтр». № 125315, опубл. 10.05.2018 бюл. № 9. Автори О.В. Захаров, М.Ю. Ільченко, С.О. Розенко, Л.С. Пінчук.

- Патент на корисну модель «Мікросмужковий смуго-пропускаючий фільтр», заявка № U201810 493 від 24.10.2018. Автори Захаров О.В., Ільченко М.Ю., Літвінцев С.М., Пінчук Л.С.

#### **5. Порівняння зі світовими аналогами.**

Результати досліджень відповідають світовому рівню, а в деяких випадках перевершують його. Нові теоретичні положення і технічні рішення можуть бути використані при створенні нового покоління мікрохвильових фільтрів для засобів телекомунікацій, в тому числі для перспективної станції зв'язку.

#### **7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, відомства, підприємства, організації).**

Потенційними замовниками та користувачами результатів можуть бути вітчизняні підприємства радіотехнічного профілю.

Міністерство освіти та науки України, вищі навчальні заклади при підготовці фахівців та наукових кадрів телекомунікаційного профілю.

Державний департамент зв'язку та інформації при формуванні засад щодо впровадження в Україні перспективних телекомунікаційних технологій.

Отримані теоретичні результати у вигляді науково обґрунтованих методів побудови планарних фільтрів з покращеними характеристиками можуть бути застосовані при проектуванні та виробництві нового покоління засобів телекомунікацій.

У подальшому, потенціальними замовниками та користувачами результатів можуть бути вітчизняні підприємства: НВП "Сатурн" (м. Київ), АТ „Радіо телекомунікаційні системи” (м. Київ), АТ „Міррад” (м. Київ), ВАТ „АТ НДІ РВ” (м. Харків), ДБ „Оріон-Навігація” (м. Сміла) та інші.

## 8. Стан готовності розробки.

Лабораторні зразки.

## 10. Назва підрозділу, телефон, e-mail.

Науково-дослідний інститут телекомунікацій КПІ ім. Ігоря Сікорського, т. 454-98-21.

## 11. Фото розробки.



Фото 1 - Трирезонаторний мікросмушковий фільтр затримки зі змішаними зв'язками.

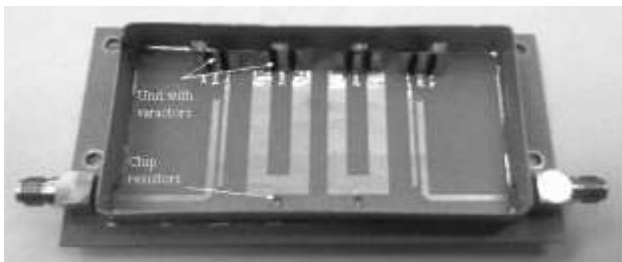


Фото 2 - Фільтр з гребінчастими і петльовими резонаторами.

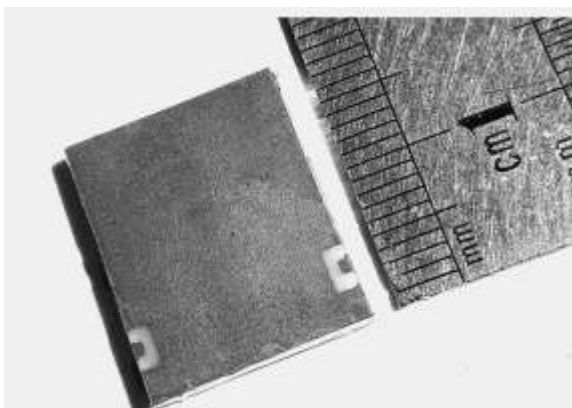


Фото 3 - Смувечний СТ фільтр шостого порядку зі змішаними перехресними зв'язками.

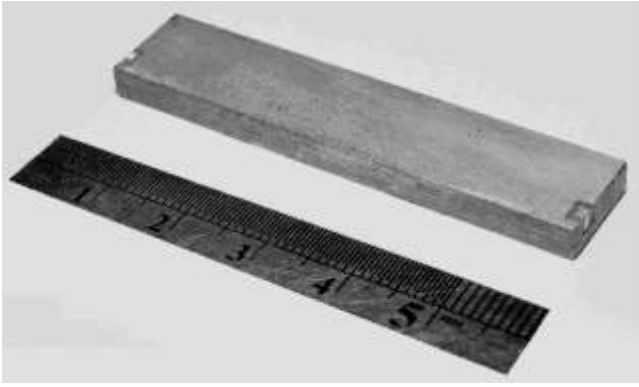


Фото 4 – Смушковий 9-резонаторний гребінчастий фільтр.

## 12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання.

1. A. Zakharov, S. Rozenko and M. Ilchenko, "Two types of trisection bandpass filters with mixed cross-coupling" *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol.28, no. 7, pp.585-587, Jul.2018. DOI: 10.1109/LMWC.2018.2837905.
2. A. Zakharov, M. Ilchenko, " Trisection microstrip delay line filter with mixed cross-coupling," *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* vol. 27, no. 12, pp. 1083-1087, Dec. 2017. DOI: 10.1109/LMWC.2017.2759724.
3. A. Zakharov, S. Rozenko, and M. Ilchenko, "Varactor-Tuned Microstrip Bandpass Filter with Loop Hairpin and Compline Resonators," *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs.* Published 1.10.2018. DOI: 10.1109/TCSII.2018.2873227.
4. Alexander V. Zakharov, Sergii A. Rozenko, Ludmila S. Pinchuk Symmetric stripline duplexer. *Radioelectronics and Communications Systems.* 2017. Vol. 60, No. 11, pp. 495-502. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0735272717110048>.
5. A. V. Zakharov, M. E. Il'chenko. Millimeter-Wave Strip-Line Bandpass Filters. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2017, Vol. 62, No. 10, pp. 1184–1192 DOI: 10.1134/S1064226917100199
6. A.V. Zakharov, M.E. Il'chenko, and I.V. Trubarov. Compline Filters Designed on Symmetric Stripline. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2017, Vol. 62, No. 6, pp. 626-633. DOI: 10.1134/S1064226917060262
7. A.V. Zakharov, M.Ye. Ilchenko, Oleksandr Lysenko, L.S. Pinchuk Stripline bandpass filters with alternating coupling coefficients. *Radioelectronics and Communications Systems.* 2017. Vol. 60, No. 4, pp. 173-180. DOI: 10.3103/S0735272717040033.
8. A. V. Zakharov, M. Ye. Ilchenko, L. S. Pinchuk Thin stripline bandpass filters for the centimeter band. *Radioelectronics and Communications Systems.* 2017. Vol. 60, No. 2, pp. 88-98. DOI: 10.3103/S0735272717020030.
9. A.V. Zakharov, M.E. Il'chenko, and I.V. Trubarov. Planar Three-Resonator Bandpass Filters with Cross Coupling. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2017, Vol. 62, No. 2, pp. 185–193 DOI: 10.1134/S1064226917020127.
10. A.V. Zakharov. Design of Resonators from Sections of Irregular Transmission Lines. *Journal of Communications Technology and Electronics.* 2016. Vol. 61, No. 11, pp. 1294-1304 DOI: 10.1134/S1064226916110127.
11. A. V. Zakharov, Mikhail Ye. Ilchenko, Igor V. Trubarov, L. S. Pinchuk. Stripe delay filters. *Radioelectronics and Communications Systems.* 2016. Vol. 59, No. 4. P. 173 - 178. DOI: <http://dx.doi.org/10.3103/S073527271604004X>.
12. A. V. Zakharov, M.E. Il'chenko. Wideband planar filters with an extended stopband. *Journal of Communications Technology and Electronics.* 2016. Vol. 61, No. 3, pp. 291 - 301. DOI: 10.1134/S1064226916030220.
13. Alexander V. Zakharov. Tunable RX filter with Ferroelectric Capacitors for DCS, PCS and UMTS Communication Systems. *XI International Conference on Antenna Theory and Techniques.* 24-27 May 2017, Kyiv, pp.297-300. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972648.

14. Alexander V. Zakharov. Unconventional Connection of Ferroelectric Capacitors to Resonators in Tunable Filters. *XI International Conference on Antenna Theory and Techniques*. 24-27 May 2017, Kyiv, pp. 301-304. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972649.
15. А.В. Захаров. "Влияние геометрических параметров и диэлектрической проницаемости полосковых фильтров на коэффициенты связи между резонаторами" *Радиотехника и электроника*. 2018, том 63, №3, с. 277-285. DOI: 10.7868/S0033849418030099
16. А.В. Захаров, М.Е. Ильченко. Смешанные связи в полосковых и микрополосковых полосно-пропускающих фильтрах. *Радиотехника и электроника*. 2018, том 63, № 6, с. 607-618. DOI: 10.7868/S0033849418060141.
17. А.В. Захаров, М.Е.Ильченко, Л.С. Пинчук. Особенности взаимодействия ступенчато импедансных полосковых резонаторов в гребенчатых фильтрах. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. Том 61, № 1, январь 2018. Стр. 33-46. DOI:10.20535/S002134701801003X.
18. А.В. Захаров, С.А. Розенко, Л.С. Пинчук. Микрополосковый полосно-пропускающий фильтр с левосторонним нулем передачи, регулируемым паразитной перекрестной связью. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. Том 61, № 6, июнь 2018. Стр. 358 - 368. DOI: 10.20535/S0021347018060067
19. А.В. Захаров, М.Е. Ильченко. Перестраиваемые варикапами узкополосные фильтры с расширенной полосой заграждения на основе П-образных микрополосковых резонаторов. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. Том 60, № 9, сентябрь 2017. стр. 491-502. DOI: <https://doi.org/10.20535/S0021347017090011>.
20. А.В. Захарова и С.А. Розенко "Микрополосковые полосно-пропускающие перестраиваемые фильтры с комбинированными резонаторами". РТ и Э. В печати.
21. А.В. Захарова и С.А. Розенко "Микрополосковые полосно-пропускающие фильтры с паразитными связями, содержащие четвертьволновые и П-образный резонаторы".РТ и Э. В печати.
22. А.В. Захаров, С.А. Розенко, Л.С. Пинчук "Использование матрицы связи при описании полосно-пропускающих фильтров, включающих резонатор проходного типа", *Изв. Вузов. Радиоэлектроника*. В печати.

**13. Надати ключові слова до розробки.** Багатоярусні смуго-пропускаючі фільтри планарної конструкції, перехресний зв'язок, східчасто-імпедансні резонатори; нуль передачі; частотна характеристика.