

ОПИС ЗАВЕРШЕНОЇ РОЗРОБКИ

Найменування розробки «Створення теорії та схемотехнічних рішень немінімально-фазових планарних фільтрів зі змішаними зв'язками для засобів телекомунікацій» “Development of theory and circuit solutions of non-minimum-phase planar filters with mixed couplings for telecommunications”.

1. Номер державної реєстрації 0119U100622; номер реєстрації в університеті 2213-ф.
2. Науковий керівник
Захаров Олександр Віталійович, д.т.н., с.н.с.; Alexander Zakharov, D.Sc. degree.
3. Суть розробки, основні результати. (*укр., англ.; обсягом не менше 1500–2000 знаків кожною мовою*).

Об'єктом дослідження є немінімально-фазові радіохвильові фільтри планарної конструкції (смужкові та мікросмужкові), які поряд з резонаторами відбивного типу містять резонатори прохідного типу, і в яких використовуються змішані електромагнітні зв'язки між резонаторами.

Предмет дослідження — вплив змішаних коефіцієнтів зв'язку електромагнітного характеру на частотні характеристики більш складних немінімально-фазових планарних фільтрів, що має привести до створення нової теорії.

За результатами НДР створено теорію планарних немінімально-фазових фільтрів третього та четвертого порядку для засобів телекомунікацій з різноманітними частотними характеристиками. Створено методики побудови зазначених фільтрів, які не використовують низькочастотні прототипи, а дозволяють безпосередньо обчислити схемні елементи. Запропоновано і проаналізовано нові конструкції планарних смугопропускаючих фільтрів (СПФ) з перехресними зв'язками, 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 від одного східчасто-імпедансних резонаторів (SIR), електромагнітний зв'язок між якими носить змішаний характер, як ємнісний, так і індуктивний. Отримані експериментальні зразки нових планарних немінімально-фазових фільтрів третього та четвертого порядку для засобів телекомунікацій, та результати їх експериментального дослідження, які підтверджують теоретичні положення створеної теорії.

По результатам роботи опубліковано 11 статей в журналах IEEE, які належать до першого квартиля Q1, 2 статті в журналах, які належать до другого квартиля Q2. Всього опубліковано 18 статей, які проіндексовані в наукометричній базі Scopus. Опубліковано 7 докладів в матеріалах міжнародних IEEE конференцій, що входять до наукометричної бази Scopus. За результатами НДР написано розділ книги: “Planar bandpass filters with mixed couplings”. Lecture Notes in Networks and Systems, 2021, що використовуватиметься для підготовки аспірантів за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка. В роботі брали участь два здобувача наукового ступеня PhD і кандидата технічних наук, чий дисертації близькі до завершення.

За час виконання НДР сумарний індекс Гірша виконавців проєкту збільшився з $h=13$ до $h=30$, що сприяє покращенню показників КПП ім. Ігоря Сікорського у світових рейтингах університетів.

The object of the study is non-minimal-phase radio-wave filters of planar design (stripline and microstrip), which, in addition to reflection-type resonators, contain through-type resonators, and which use mixed electromagnetic couplings between resonators.

The subject of research is the influence of mixed electromagnetic coupling on the frequency characteristics of more complex non-minimal-phase planar filters, which should lead to the creation of a new theory.

According to the results of research, the theory of planar non-minimal-phase filters of the third and fourth order for telecommunications with different frequency responses was created. Techniques for constructing these filters have been developed, which do not use low-frequency prototypes, but allow direct calculation of circuit elements. New designs of planar band-pass filters (BPF) with cross-couplings, which are characterized by a wide variety of implemented frequency responses, are proposed and analyzed. Along with increased one-sided selectivity, they may have a symmetric frequency response with attenuation pole located to the right and left of the bandwidth. The basis of the filters are pairs of closely spaced step-impedance resonators (SIR), the electromagnetic connection between which is mixed, both capacitive and inductive. Experimental samples of new planar non-minimal-phase filters of the third and fourth order for telecommunications are obtained, and the results of their experimental research, which confirm the theoretical provisions of the theory.

As a result of the work, 11 articles were published in IEEE journals belonging to the first quartile of Q1, 2 articles in journals belonging to the second quartile of Q2. A total of 18 articles have been published, which are indexed in the Scopus database. 8 papers have been published in the materials of international IEEE conferences, which are part of the Scopus database. According to the results of the research, Book Chapter was written: "Planar bandpass filters with mixed couplings". Lecture Notes in Networks and Systems, 2021, which will be used to prepare graduate students in 172 Telecommunications and Radio Engineering. The work was attended by two PhD graduates and a candidate of technical sciences, whose dissertations are close to completion.

During the research period, the total h-index performers of the project increased from $h = 13$ to $h = 30$, which contributes to the improvement of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute in the world rankings of universities.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності (*заявка на патент, патент, свідоцтво на авторське право*).

Одержано 3 патента України:

Патент на корисну модель «Смуго-пропускаючий решітчастий фільтр», № 146716 від 10.03.2021, Бюл. № 10. Автори О.В. Захаров, С.О. Розенко, С.М. Літвінцев, Л.С. Пінчук.

Патент на корисну модель «Смуго-пропускаючий гребінчастий фільтр», № 145151 від 26.11.2020, бюл. № 22. Автори О.В. Захаров, С.О. Розенко, С.М. Літвінцев, Л.С. Пінчук.

Патент на корисну модель «Мікросмужковий смугопропускаючий фільтр», № 135153, опубл. 25.06.2019 бюл. № 12. Автори Захаров О.В., Ільченко М.Ю., Літвінцев С.М., Пінчук Л.С.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Призначення фільтрів у радіоапаратурі різноманітне: вони можуть застосовуватися у дуплексерах та мультиплексорах для розділення або складання сигналів різних частот, для обмеження спектра потужного вихідного сигналу, як лінії затримки сигналу за часом. Такі фільтри працюють в широкому діапазоні частот (0,1 ÷ 30 ГГц), мають різноманітні частотні характеристики та застосовуються в багатьох системах, в яких прийом чи передача інформації здійснюється по радіоканалам.

У попередні роки світове суспільство докладало значних зусиль на вирішення проблеми мініатюризації смуго-пропускаючих фільтрів для засобів телекомунікацій,

особливо стільникової телефонії. Технологія смужкових смуго-пропускаючих фільтрів при використанні керамічних матеріалів з великим значенням $\epsilon_r = 80 \dots 100$ дозволяє здійснити подальшу мініатюризацію. Ця технологія дозволяє виробляти фільтри товщиною 0,5 мм і менше. В даній роботі було створено теорію мініатюрних планарних фільтрів, які мають одночасно і поліпшені частотні характеристики. Ця теорія дає можливість подальшої мініатюризації фільтрів для засобів телекомунікацій. В цьому і полягає її велике значення для світового суспільства.

Ми створили малогабаритні планарні фільтри зі смугою пропускання від 400 до 500 МГц, які працюють на підвищених рівнях потужності і мають підвищену вибірковість і симетричну АЧХ. Зауважимо, що малогабаритні фільтри на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) і на зосереджених елементах не можуть бути використані для цих цілей.

Результати досліджень відповідають світовому рівню, а в деяких випадках перевершують його.

6. Економічна привабливість для просування на ринок (*вартість реалізації проекту, терміни впровадження та окупності, показники*).

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

Нові теоретичні положення і технічні рішення, створені в рамках даного проекту, спрямовані на створення нового покоління мікрохвильових фільтрів для засобів телекомунікацій, розвиток власної елементної бази України в галузі радіоелектроніки, яка не буде поступатися світовим лідерам. Результати роботи можуть бути використані підприємствами радіотехнічного профілю України.

8. Стан готовності розробки (*лабораторний або промисловий зразок, технічна документація, бізнес-план, готова до впровадження тощо із зазначенням технологічного рівня готовності (TRL)*).

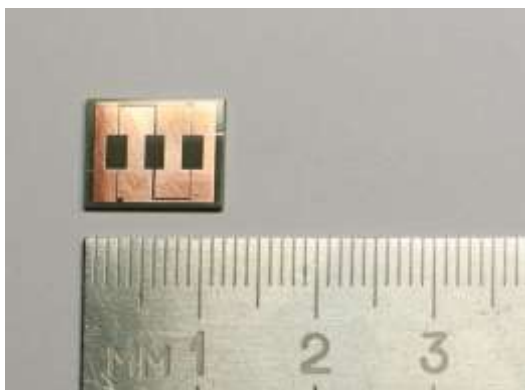
Лабораторний зразок.

9. Існуючі результати впровадження.

10. Назва підрозділу, телефон, e-mail.

НДІ телекомунікацій Інституту телекомунікаційних систем
067-231-8204, e-mail azakharov@its.kpi.ua; azakharov217@gmail.com

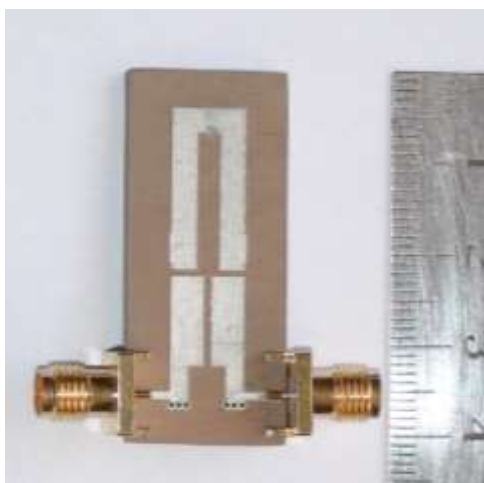
11. Фото (**обов'язково**) або кілька слайдів презентації з фото розробки в електронному вигляді (**рекламного характеру**). Якщо фото надається окремим файлом, бажано використовувати JPEG формат.



Мікросмужкова конструкція смуго-пропускаючого фільтра



Фільтр затримки



Квазіеліптичний фільтр

12. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання (*вагомі: монографії, підручники, посібники, наукові статті, дисертації, інші публікації*).

1. A. Zakharov "Transmission zeros of trisection and quadruplet bandpass filters with mixed cross-coupling," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 69, no.1, Part 1, pp. 89-100, Jan. 2021. **Q1**
2. A. Zakharov, M. Ilchenko "Coupling coefficients between resonators in stripline combline and pseudocomblin bandpass filters," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 68, no. 7, pp. 2679-2690, Jul. 2020. **Q1**.
3. A. Zakharov, S. Rozenko, L. Pinchuk, and S. Litvintsev "Microstrip quazi-elliptic bandpass filter with two pairs of anti-parallel mixed-coupled SIRs," IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett, vol. 31, no. 5, pp. 433-436, May. 2021. **Q1**.
4. A. Zakharov, S. Rozenko, S. Litvintsev, and M. Ilchenko " Trisection bandpass filter with mixed cross-coupling and different paths for signal propagation," IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett., vol. 30, no. 1, pp. 12-15, Jan. 2020. **Q1**.
5. A. Zakharov, S. Litvintsev, and M. Ilchenko "Trisection bandpass filters with all mixed couplings," IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett., vol. 29, no. 9, pp. 592-594, Sep. 2019. **Q1**.
6. A. Zakharov, S. Rozenko, S. Litvintsev, and M. Ilchenko "Hairpin resonators in varactor-tuned microstrip bandpass filter," IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs, vol. 67, no. 10, pp. 1874-1878, Oct. 2020. **Q1**.
7. A. Zakharov, S. Litvintsev, and M. Ilchenko "Transmission line tunable resonators with intersecting resonance regions", IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs, vol. 67, no. 4, pp. 660-664, Apr. 2020. **Q1** .

8. A. Zakharov, M. Ilchenko, S. Rozenko, L. Pinchuk, Book Chapter: "Planar bandpass filters with mixed couplings". *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021, 152, с. 377-393, **1.381 д/а**.

9. A. Zakharov, "Parametric and structural-parametric synthesis of nonuniform transmission line resonators," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 68, no.3, pp.1055-1067, Mar.2021. **Scopus, Q1, 1.245 д/а**.

10. A. Zakharov, M. Ilchenko, "Circuit function characterizing tunability of resonators," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 67, no. 1, pp. 98-107, Jan. 2020. **Scopus, Q1, 0.957 д/а**.

11. A. Zakharov, M. Ilchenko, "Unloaded quality factor of transmission line resonators with capacitors," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 67, no. 7, pp. 2204-2215, Jul. 2020. **Scopus, Q1, 1.149 д/а**.

13. Надати ключові слова до розробки

Смуго-пропускаючий фільтр, частотні характеристики, нуль передачі, полюс згасання, лінійна фаза, планарні конструкції

Bandpass filter, frequency responses, transmission zero, attenuation pole, linear phase, planar design

**Ваша розробка буде розміщена в базі завершених розробок на сайті
Наука та інноватика КПІ ім. Ігоря Сікорського <http://science.kpi.ua/>.**

Організаційно-аналітичний відділ НДЧ,

e-mail: o.savitch@kpi.ua

к. 138-1. Тел. 204-92-00.