

Секція 5. Електроніка, радіотехніка та телекомунікації

Назва пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки згідно з Законом України

1. Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави.

Назва напрямку секції

2. Науково-технічні проблеми радіотехніки. 2.1. Теорія кіл, сигналів та процесів у радіотехніці і електроніці.

2. Науково-технічні проблеми радіотехніки. 2.2. Схемотехніка радіоелектронних пристроїв.

**АНОТОВАНИЙ ЗВІТ
за 2 етап науково-дослідної роботи
(2020 рік)
(фундаментальне дослідження)**

1. **Тема НДР:** Створення теорії та схемотехнічних рішень немінімально-фазових планарних фільтрів зі змішаними зв'язками для засобів телекомунікацій

2. **Керівник НДР:** Захаров Олександр Віталійович

3. **Номер державної реєстрації НДР:** 0119U100622

4. **Назва вищого навчального закладу, наукової установи:** **Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**, **Науково-дослідний інститут телекомунікацій.**

5. **Терміни виконання етапу:** початок – 01.01.2020 р., закінчення – 31.12.2020 р.

6. **Обсяг коштів, виділених на виконання НДР за весь період (згідно з запитом / фактичний)** 390 / 390 тис. гривень.

7. Короткий зміст запиту.

Об'єкт дослідження — немінімально-фазові радіохвильові фільтри планарної конструкції (смушкові та мікросмушкові), 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.

Мета — дослідження закономірностей комбінованої електромагнітної взаємодії в планарних немінімально-фазових фільтрах зі змішаними зв'язками та розвиток на їх основі теорії і практики побудови нового покоління фільтрів з покращеними характеристиками для засобів телекомунікацій.

Призначення — роботу спрямовано на розвиток теорії побудови планарних немінімально-фазових фільтрів для засобів телекомунікацій. Цей напрямок потребує подальшого розвитку як в теоретичному, так і практичному плані. Використання змішаних коефіцієнтів зв'язку в планарних структурах відкриває додаткові можливості для побудови фільтрів з більш різноманітними частотними характеристиками і більш широкими функціональними можливостями. Призначення фільтрів у радіоапаратурі різноманітне: вони можуть застосовуватися у дуплексерах та мультіплексерах 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. Теорія дасть можливість подальшої мініатюризації та вдосконалення фільтрів для засобів телекомунікацій.

Актуальність роботи обумовлена широким попитом на фільтри з покращеними характеристиками для засобів телекомунікацій і можливістю задовольнити цей попит за рахунок використання більш складної електромагнітної взаємодії між резонаторами в планарних структурах, яка містить в собі великі потенційні можливості. Про перспективність використання в фільтрах змішаних коефіцієнтів зв'язку свідчать попередні результати авторів цієї роботи: вперше створений фільтр затримки з мінімальним числом резонаторів ($n = 3$); смужковий смуго-пропускаючий фільтр мінімальних розмірів ($5,8 \times 4,2 \times 2$ мм), що працює на частоті 1,85 ГГц і має два полюси загасання.

Такі фільтри масово використовуються в підсилювачах сигналів, базових станціях стільникової телефонії та застосовуються в багатьох інших сферах, включаючи військову.

Ми сподіваємося, що теорію, створену в рамках даної роботи буде спрямовано на створення нового покоління радіоелектронних елементів для систем телекомунікацій, розвиток власної елементної бази України в галузі радіоелектроніки, яка не буде поступатися світовим лідерам.

8. Опис процесу наукового дослідження за звітним етапом.

Проведено дослідження змішаних коефіцієнтів зв'язку в мікросмужкових конструкціях фільтрів.

Визначені особливості комбінованої електромагнітної взаємодії між резонаторами планарних структур, які можуть бути використані для створення нових немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку.

Встановлено нові ефекти електромагнітної взаємодії між резонаторами мікросмужкової і смужкової конструкцій, які слід враховувати при побудові смуго-пропускаючих фільтрів четвертого порядку.

Визначено, що можливі чотири варіанти розташування нулів передачі:

- Симетричний квадруплет смуго-пропускаючого фільтру зі змішаним перехресним зв'язком K_{14} має чотири різних стани, які характеризуються трьома нулями передачі і особливим їх розташуванням

- Перші два стани мають місце при K_{14} і K_{23} одного знаку. У цьому випадку два його нуля передачі розташовуються на осі σ , а один розташовується на осі $j\Omega$ різним чином: при $K_{14}, K_{23} > 0$ він розташовується на додатній напівосі $j\Omega$; при $K_{14}, K_{23} < 0$ він розташовується на від'ємній напівосі $j\Omega$. Ці два стани відповідають фільтру затримки з підвищеною правобічною або лівосторонньою вибірковістю.

- Другі два стани мають місце при K_{14} і K_{23} різних знаків. В цьому випадку три його нулі передачі розташовуються на осі $j\Omega$ різним чином: при $K_{14} > 0$ два нуля передачі розташовуються на додатній напівосі $j\Omega$ а один нуль передачі на від'ємній напівосі $j\Omega$; при $K_{14} < 0$ два нуля передачі розташовуються на від'ємній напівосі $j\Omega$ а один нуль передачі на додатній напівосі $j\Omega$.

Отримано експериментальні зразки нових планарних немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку та результати їх експериментального дослідження.

Запропоновано смужковий фільтр четвертого порядку, який має значне різноманіття частотних відкликів завдяки різним сполученням розміщень нулів передачі. Вони мають дві пари нулів передачі на дійсних частотах, розташованих еквідистантно щодо f_0 . Ці нулі передачі можуть розташовуватися зі зміщенням в одну або іншу сторону, з одного боку від f_0 може бути три нуля передачі, а з іншого тільки один. Ці фільтри можуть виконувати функцію фільтра затримки, що має одночасно підвищену частотну вибірковість. Його два нуля передачі на дійсних частотах можуть бути розміщені

симетрично щодо смуги пропускання, а також ліворуч або праворуч від смуги пропускання.

Другий фільтр четвертого порядку може мати три нулі передачі на дійсних частотах, два з яких розташовані зліва від f_0 , а один праворуч від f_0 . Цей смуго-пропускаючий фільтр може знайти застосування в дуплексерах.

Створено методики побудови планарних немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку з різноманітними частотними характеристиками.

Вперше були вивчені змішані коефіцієнти зв'язку між східчасто-імпедансними резонаторами (SIR) в смуго-пропускаючих фільтрах (PPF - СПФ) четвертого порядку. Внесення в подібні СПФ змішаного перехресного зв'язку K_{14} робить їх частотні відклики більш різноманітними. Такі фільтри вирізняються чотирма станами з особистим розташуванням трьох нулів передачі. Ці стани є принципово новими, вони відповідають фільтру затримки з підвищеною односторонньою вибірковістю, який має полюс загасання на дійсних частотах.

Ці нулі передачі контролюються за допомогою аналітичних виразів, які включають коефіцієнти зв'язку, звичайні та змішані. Це дозволяє проектувати різні СПФ четвертого порядку з відрізків ліній передачі із змішаним перехресним зв'язком, базуючись на розрахункових формулах.

Результати етапу

Номер етапу	Назва етапу згідно з технічним завданням	Заплановані результати етапу	Отримані результати етапу
2	<p>2 етап (2020 р.)</p> <p><i>1 квартал</i> Дослідження ефектів комбінованої електромагнітної взаємодії в планарних немінімально-фазових фільтрах четвертого порядку.</p> <p>Дослідження змішаних коефіцієнтів зв'язку в мікросмужкових конструкціях фільтрів.</p> <p><i>2 квартал</i> Дослідження змішаних коефіцієнтів зв'язку в смужкових конструкціях фільтрів.</p> <p><i>3 квартал</i> Побудова нових планарних немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку з покращеними характеристиками.</p> <p><i>4 квартал</i> Створення теорії планарних немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку зі змішаними зв'язками.</p>	<p>(За 2020 рік)</p> <p>Особливості комбінованої електромагнітної взаємодії між резонаторами планарних структур, які можуть бути використані для створення нових немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку.</p> <p>Нові ефекти електромагнітної взаємодії між резонаторами мікросмужкової і смужкової конструкцій, які слід враховувати при побудові смуго-пропускаючих фільтрів четвертого порядку.</p> <p>Методики побудови планарних немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку з</p>	<p>В результаті аналізу встановлено нові ефекти електромагнітної взаємодії між резонаторами мікросмужкової і смужкової конструкцій, які слід враховувати при побудові смуго-пропускаючих фільтрів четвертого порядку.</p> <p>Встановлено, що можливі чотири варіанти розташування нулів передачі: симетричний квадруплет смуго-пропускаючого фільтру зі змішаним перехресним зв'язком K_{14} має чотири різних стани, які характеризуються трьома нулями передачі і особливим їх розташуванням.</p>

		<p>різноманітними частотними характеристиками.</p> <p>Експериментальні зразки нових планарних немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку та результати їх експериментального дослідження.</p> <p>Теорії планарних немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку.</p> <p>2 статті в журналах, що індексуються в Scopus,</p> <p>1 стаття у фахових виданнях та міжнародних конференціях</p> <p>1 патент України</p>	<p>Створено методики побудови планарних немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку з різноманітними частотними характеристиками. Це дозволяє проектувати різні СПФ четвертого порядку з відрізків ліній передачі із змішаним перехресним зв'язком, базуючись на розрахункових формулах.</p> <p>Отримано експериментальні зразки нових планарних немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку та результати їх експериментального дослідження.</p> <p>Запропоновано смужковий фільтр четвертого порядку, який має значне різноманіття частотних відкликів завдяки різним сполученням розміщень нулів передачі.</p> <p>7 статей в журналах, що індексуються в Scopus,</p> <p>2 доповіді на міжнародній конференції</p> <p>1 патент України</p>
--	--	--	--

9. Наукова новизна та значимість отриманих наукових результатів.

1) Встановлено, що смужковий фільтр четвертого порядку може мати три нулі передачі на дійсних частотах, два з яких розташовані зліва від f_0 , а один праворуч від f_0 . Цей фільтр може бути фільтром затримки з підвищеною правобічною вибірковістю за рахунок нуля передачі f_c , розташованого праворуч від f_0 . За рахунок цього запропоновано смужковий фільтр четвертого порядку, що має значне різноманіття частотних відгуків. Розташування двох нулів передачі, розташованих з одного боку від f_0 , є вельми привабливим для використання цих фільтрів в дуплексерах.

2) Розроблено методику побудови планарних немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку з різноманітними частотними характеристиками.

3) Розроблено теорію, її положення підтверджені вимірами на діючих зразках. Наведено результати моделювання частотних характеристик немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку з різноманітними частотними характеристиками. Фільтри характеризуються малими габаритами.

10. Відповідність отриманих наукових результатів сучасному рівню досліджень в даній галузі.

Використання нового ефекту комбінованої електромагнітної взаємодії в планарних структурах відкриває широкі можливості для побудови нових немінімально-фазових фільтрів. Річ у тому, що у немінімально-фазових фільтрів використовуються додаткові перехресні зв'язки між резонаторами, які значно менші, ніж основні, та можуть мати такий же знак чи протилежний. Основна концепція полягає в тому, щоб розташувати резонатори певним чином, так, щоб організувати перехресні змішані зв'язки. Для цього також використовуються додаткові перемички між несуміжними резонаторами. Такі фільтри дуже компактні.

Ефект переходу коефіцієнту зв'язку через нуль дає можливість отримувати малі значення коефіцієнтів зв'язку обох знаків, що дуже істотно при використанні їх в якості перехресних зв'язків в немінімально-фазових фільтрах. Як відомо, немінімально-фазові фільтри мають покращену селективність за рахунок полюсів згасання або постійний час затримки в смузі пропускання (фільтри затримки). Фільтри зі змішаними зв'язками мають великі розміри і не досить хороші частотні характеристики, оскільки для їх побудови не використані наукові методи і розрахункові формули. Ці фільтри є лише ілюстрацією, що представляє частотні характеристики, отримані ЕМ моделюванням, без достатнього теоретичного обґрунтування. У нас отримані формули, що відображають кількісні співвідношення, що дозволяє заздалегідь передбачати характеристики і реалізовувати їх. Отримані на даному етапі НДР результати відповідають світовому рівню, а по деяким позиціям і перевищують його, про що свідчать 6 статей, опублікованих в наукових журналах Q1.

Рівень розвитку теорії і практики побудови немінімально-фазових фільтрів можна охарактеризувати як досить високий. У той же час практичні потреби диктують необхідність створення фільтрів більш високого рівня — з меншими габаритними розмірами, з більш високою вибірковістю, з розширеною смугою загородження, з постійним часом затримки.

Отримані на цьому етапі малогабаритні планарні немінімально-фазові фільтри четвертого порядку було покладено в основу розробки методики побудови малогабаритних планарних немінімально-фазових фільтрів для засобів телекомунікацій.

11. Практична цінність результатів НДР.

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.

В військовій сфері вони використовуються: в авіаційних, наземних та морських системах зв'язку; авіаційних системах пізнання «свій – чужий»; системах керування безпілотними летальними апаратами; в бортових і наземних радіолокаційних станціях; системах прицілювання та супроводження ракет; в системах виявлення робочої частоти радіотехнічних засобів противника тощо.

Створені методики описують нові планарні фільтри перспективного напрямку подальшої мініатюризації смуго-пропускаючих фільтрів для засобів телекомунікацій. Отримані знання будуть використані для досягнення прогресу в теорії і практиці побудови фільтрів широкого і спеціального призначення. Ми сподіваємося, що теорію, створену в рамках даного проекту буде спрямовано на створення нового покоління радіоелектронних елементів для систем телекомунікацій, розвиток власної елементної бази України в галузі радіоелектроніки, яка не буде поступатися світовим лідерам.

12. Використання результатів роботи у навчальному процесі за 2020 р.

Не передбачено пунктами запиту і експертними оцінками.

13. Результативність виконання ЕТАПУ науково-дослідної роботи

№ з/п	Критерії	Заплановано (відповідно до запиту)	Виконано (за результатами НДР)	% Виконання
		кількість	кількість	%
1.	Публікації колективу виконавців НДР:			
	1.1. Статті у журналах, що входять до наукометричних баз даних.	2	7	350
	1.2. Публікації в матеріалах конференцій, що входять до наукометричних баз даних.	1	2	200
	1.3. Статті у журналах, що включені до переліку наукових фахових видань України.	-	-	-
	1.4. Публікації у матеріалах конференцій, тезах доповідей та виданнях, що не включені до переліку наукових фахових видань України.	Не передбачено запитом		
	1.5. Монографії та розділи монографій, опубліковані за рішенням Вченої ради закладу вищої освіти (наукової установи).	Розділ	Розділ	100
	1.6. Підручники, навчальні посібники з грифом МОН України.	Не передбачено запитом		
	1.7. Навчальні посібники без грифу МОН України.	Не передбачено запитом		
1.8. Словники, довідники.	Не передбачено запитом			
2.	Підготовка наукових кадрів:			
2.1. Захищено докторських дисертацій за тематикою НДР.				

	2.2. Подано до розгляду у спеціалізовану вчену раду докторських дисертацій за тематикою НДР.			
	2.3. Захищено кандидатських дисертацій за тематикою НДР.			
	2.4. Подано до розгляду у спеціалізовану вчену раду кандидатських дисертацій за тематикою НДР.			
	2.5. Захищено магістерських робіт за тематикою НДР.	Не передбачено запитом		
3.	Охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності, які створено за тематикою НДР:			
	3.1. Отримано патентів (свідочтв авторського права) України.	1	1	100
	3.2. Подано заявок на отримання патенту України.		1	
	3.3. Отримано патентів (свідочтв авторського права) інших держав.			
	3.4. Подано заявок на отримання патенту інших держав.			
4.	Участь з оплатою у виконанні НДР:	Не передбачено запитом		
	4.1. Студентів.	Не передбачено запитом		
	4.2. Молодих учених та аспірантів.	Не передбачено запитом		

14. Бібліографічний перелік монографій, підручників, посібників, словників, довідників, наукових статей, інших публікацій; подані заявки та отримані патенти; теми захищених та поданих до розгляду у спеціалізовану вчену раду дисертацій (за матеріалами досліджень за період виконання НДР). Тільки у такій послідовності.

Опубліковано розділ книги, який індексуються в Scopus

1) Розділ А. Zakharov, M. Ilchenko, S. Rozenko, L. Pinchuk “Planar bandpass filters with mixed couplings”. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021, vol. 152, p. 377-393.

Опубліковані статті в журналах, які індексуються в Scopus

2) 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, (Q1). DOI: 10.1109/TCSI.2019.2940066.

3) 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). DOI: 10.1109/LMWC.2019.2957207.

4) 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). DOI: 10.1109/TCSII.2019.2922429.

5) 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, (Q1). DOI: 10.1109/TCSI.2020.2971112.

6) A. Zakharov, M. Ilchenko, "Coupling coefficients between resonators in stripline combline and pseudocombine bandpass filters," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 68, no. 7, part: 1, pp. 2679-2690, Jul. 2020, (Q1). DOI: 10.1109/TMTT.2020.2988866.

7) A. Zakharov, S. Rozenko, S. Litvintsev, and M. Ilchenko, "Hairpin Resonator in Varactor-Tuned Microstrip Bandpass Filters". IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 67, no. 10, pp. 1874-1878, Oct. 2020, (Q1). DOI: 10.1109/TCSII.2019.2953247.

8) A. Zakharov, S. Rozenko, S. Litvintsev, L.S. Pinchuk "Microstrip BPFs with Increased Selectivity and Asymmetric Frequency Responses». *Radioelectronics and Communications Systems*, Vol. 63, no 7, p. 353-367. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0735272720070031>.

Публікації в матеріалах конференцій, що входять до наукометричних баз даних

9) S. Litvintsev, S. Rozenko, L. Pinchuk, G. Avdeyenko, "Method of stopband expansion for pseudocombine bandpass filters," in *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, 2020, pp. 630–634, doi: <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252658>.

10) S. Litvintsev, S. Rozenko, L. Pinchuk, G. Avdeyenko, "Stopband expansion of combline bpf," in *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, 2020, pp. 668–671, doi: <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252757>.

Отримано патент України

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

Подано заявку на патент України

12) Подано заявку на корисну модель «Смуго-пропускаючий решітчастий фільтр». Заявка номер u2020 07336 від 18.11.2020. Захаров О.В., Розенко С.О., Літвінцев С.М., Пінчук Л.С.

15. Кількість штатних співробітників 2 , кількість сумісників з оплатою /без оплати - / 2 , молодих учених з оплатою , кількість студентів з оплатою /без оплати / , які брали участь у виконанні НДР

16. Рішення наукової, науково-технічної ради ІТС від .12.2020 р. протокол № про закінчення етапу роботи.

Керівник роботи:

_____ О.В. Захаров
підпис

Голова НТР

НДІ телекомунікацій:

_____ М.Ю. Ільченко
підпис

МП