

Секція 5. Електроніка, радіотехніка та телекомунікації

**АНОТОВАНИЙ ЗВІТ**  
**за завершеним фундаментальним науковим дослідженням,**  
**виконання якого здійснювалось у 2019–2021 роках**

Назва «Створення теорії та схемотехнічних рішень немінімально-фазових планарних фільтрів зі змішаними зв'язками для засобів телекомунікацій»

Керівник дослідження: Захаров Олександр Віталійович

Номер державної реєстрації: 0119U100622

Номер облікової картки заключного звіту: \_\_\_\_\_

Найменування організації-виконавця: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Науково-дослідний інститут телекомунікацій

Назва пріоритетного тематичного напрямку організації-виконавця Найважливіші  
фундаментальні проблеми фізико-математичних і технічних  
наук.

Строки виконання: початок – 01.01.2019, закінчення – 31.12.2021.

Обсяг коштів, виділених на виконання дослідження за весь період (згідно із запитом / фактичний) 2820 / 1185,55 тис. гривень

**1. КОРОТКИЙ ЗМІСТ ПРОЄКТУ** (до 40 рядків тексту):

1.1. Проблема, на вирішення якої було спрямовано дослідження, обґрунтування щодо його актуальності.

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 мультиплексерах 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.

1.2. Об'єкт і предмет дослідження.

Об'єктом дослідження є 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.

### 1.3. Мета і основні завдання дослідження.

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.

В процесі виконання роботи отримані нові знання о планарних немінімально-фазових фільтрах зі змішаними зв'язками. Ці знання збагатять теорію і практику побудови фільтрів з поліпшеними характеристиками.

Дослідження цієї роботи є комплексними:

- дослідження змішаних коефіцієнтів зв'язку між резонаторами різної конфігурації в мікросмужкових, смужкових структурах і в квазі-смужкових структурах з повітряним зазором;
- виявлення закономірностей і встановлення кількісних співвідношень в планарних немінімально-фазових фільтрах третього і четвертого порядку зі змішаними зв'язками;
- побудова планарних немінімально-фазових фільтрів третього і четвертого порядку з поліпшеними характеристиками;
- виявлення закономірностей і встановлення кількісних співвідношень при каскадному з'єднанні планарних немінімально-фазових фільтрів зі змішаними зв'язками третього і четвертого порядків;
- виявлення закономірностей і встановлення кількісних співвідношень для загального випадку каскадного з'єднання немінімально-фазових фільтрів зі змішаними зв'язками;
- побудова планарних немінімально-фазових фільтрів зі змішаними зв'язками і поліпшеними характеристиками, отриманих шляхом каскадного з'єднання;
- створення теорії планарних немінімально-фазових фільтрів зі змішаними зв'язками.

1.4. Коментар. (надати обов'язково у випадку, якщо відбувалися коригування мети, предмету дослідження, основних завдань, відхилення від запланованого календарного плану роботи).

## 2. ОПИС ПРОЦЕСУ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ (до 50 рядків тексту):

2.1. Описати підходи щодо проведення досліджень, обґрунтувати їх новизну.

Один підхід, - це теоретичні дослідження та моделювання впливу конфігурації планарних резонаторів на коефіцієнт зв'язку між ними. Використовуючи сучасні програми моделювання фізичних процесів на електродинамічному рівні в планарних структурах, можна отримати повну картину взаємодії, яка частково вивчена нами лише в простіших структурах. Потрібен розвиток загальної теорії немінімально-фазових фільтрів зі змішаними зв'язками.

Інший наш підхід пов'язаний з використанням іншого схемного представлення.

Зараз домінує консервативне схемне представлення смуго-пропускаючих фільтрів, в якому резонатори представлені низкою резонансних  $LC$  контурів, а зв'язки між ними представлені інверторами провідності з додатними або від'ємними значеннями параметра  $J$ . Таке уявлення ускладнює встановлення загальних закономірностей в фільтрах зі змішаними зв'язками. Така схема свідомо виключає використання в фільтрах резонаторів прохідного типу, включених як чотириполюсник. У використовуваному нами схемному представленні використані резонатори з відрізків ліній передачі, включені на відбиття або на прохід, а елементами змішаного зв'язку служать  $LC$  контури. Таке уявлення дозволяє встановити загальні закономірності в немінімально-фазових фільтрах зі змішаними зв'язками.

2.2. Розкрити основні ідеї дослідження, яким чином вони втілювались.

Традиційно використовувані немінімально-фазові фільтри містять чвертьхвильові або півхвильові резонатори, які пов'язані між собою основними і перехресними зв'язками магнітного або електричного характеру. Основна ідея полягає в тому, щоб в планарних конструкціях використовувати резонатори більш складної форми, наприклад східчато-імпедансні резонатори (SIR), і розмістити їх на малій відстані один від одного. У цьому випадку між резонаторами буде існувати змішаний електромагнітний зв'язок, який включає магнітну і електричну компоненти. Наявність змішаних зв'язків в немінімально-фазових фільтрах дає можливість зробити їх характеристики більш різноманітними, що і підлягає дослідженню.

2.3. Навести основні гіпотези, які лягли в основу дослідження, як вони підтверджувались або спростовувались, перетворювались на теорію чи концепцію.

При виконанні НДР використовувалась гіпотеза: «якщо комбінувати додатні і від'ємні зв'язки у фільтрі, то виникають полюси згасання по обидва боки від смуги пропускання». Ця гіпотеза була покладена в основу створеного методу побудови фільтрів смужкової конструкції з переміжними знаками коефіцієнтів зв'язку. Створений метод побудови дозволив покращити вибірковість фільтрів за рахунок полюсів згасання. Також нами була висунута гіпотеза відносно того, що використання змішаних коефіцієнтів зв'язку в планарних розподілених структурах дозволить отримати ряд немінімально-фазових фільтрів з покращеними характеристиками. Ця гіпотеза підтвердилась повною мірою.

2.4. Представити нові або оновлені методи та засоби, методика та методологію досліджень, що створені авторами у ході виконання роботи; обґрунтувати, чим вони відрізняються від наявних.

Розроблено теорію планарних немінімально-фазових фільтрів третього і четвертого порядку зі змішаними зв'язками, її положення підтверджені вимірами на діючих зразках. Наведено результати моделювання частотних характеристик цих немінімально-фазових фільтрів з різноманітними частотними характеристиками. Фільтри характеризуються малими габаритами. Розроблено методика побудови планарних немінімально-фазових фільтрів третього і четвертого порядку з різноманітними частотними характеристиками. Розроблено методика побудови планарних немінімально-фазових фільтрів шляхом каскадування. Зараз немає наявних методів для каскадування фільтрів із змішаними зв'язками.

Порівняно недавно почали розглядати фільтри зі змішаними коефіцієнтами зв'язку. Результати носять ілюстративний характер, вони отримані комп'ютерним ЕМ моделюванням, правомірним лише для певної конструкції фільтрів. У них не наведені універсальні формули, що виражають взаємозв'язок між параметрами фільтрів зі змішаними зв'язками, що дозволяло б проектувати такі фільтри на основі аналітичних залежностей. Дана робота спрямована на вирішення фундаментальної наукової проблеми, що має загально світове значення, в тому числі і для питання безпеки та обороноздатності країни.

2.5. Описати особливості структури та складових проведення дослідження.

Мікрохвильові фільтри є складними електродинамічними об'єктами, що є шаруватими метало-діелектричними структурами. Їхнє дослідження включає теоретичні передбачення, математичні формули та докази, а також комп'ютерне 3D моделювання та експериментальне дослідження на основі використання векторних аналізаторів ланцюгів.

### 3. ОДЕРЖАНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 100 рядків тексту)

3.1. Результати етапів (відповідно до технічного завдання) відобразити в таблиці 1:

Таблиця 1

Номер етапу, строки	Назва етапу згідно з технічним завданням	Заплановані результати	Отримані результати
№ 1. з 01.01.2019 по 31.12.2019	<p><i>1 квартал</i> Дослідження ефектів комбінованої електромагнітної взаємодії в планарних немінімально-фазових фільтрах третього 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 третього порядку з покращеними характеристиками.</p> <p><i>4 квартал</i> Створення теорії планарних немінімально-фазових фільтрів третього порядку зі змішаними зв'язками.</p>	<p>Особливості комбінованої електромагнітної взаємодії між резонаторами планарних структур, які можуть бути використані для створення нових немінімально-фазових фільтрів третього порядку.</p> <p>Нові ефекти електромагнітної взаємодії між резонаторами мікросмужкової і смужкової конструкцій, які слід враховувати при побудові смуго-пропускаючих фільтрів третього порядку.</p> <p>Методики побудови планарних немінімально-фазових фільтрів третього порядку з різноманітними частотними характеристиками.</p> <p>Експериментальні зразки нових планарних немінімально-фазових фільтрів третього порядку та результати їх експериментального</p>	<p>Розроблено методики побудови планарних немінімально-фазових фільтрів третього порядку з різноманітними частотними характеристиками.</p> <p>Виготовлено та досліджено експериментальні зразки нових планарних немінімально-фазових фільтрів третього порядку.</p> <p>Розроблено теорії планарних немінімально-фазових фільтрів третього порядку.</p> <p>4 статті в журналах, що фіксуються в Scopus,</p> <p>4 статті у фахових виданнях, та міжнародних конференціях</p> <p>1 патент України</p>

		<p>дослідження.</p> <p>Теорії планарних немінімально-фазових фільтрів третього порядку.</p> <p>2 статті в журналах, що фіксуються в Scopus,</p> <p>1 стаття у фахових виданнях, та міжнародних конференціях</p> <p>1 патент України</p>	
<p>№ 2. з 01.01.2020 по 31.12.2020</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>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 різноманітними частотними</p>	<p>Розроблено методики побудови планарних немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку з різноманітними частотними характеристиками.</p> <p>Виготовлено та досліджено експериментальні зразки нових планарних немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку.</p> <p>Розроблено теорії планарних немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку.</p> <p>4 статті в журналах, що фіксуються в Scopus,</p> <p>3 статті у фахових виданнях та</p>

		<p>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 фіксуються в Scopus,</p> <p>1 стаття у фахових виданнях та міжнародних конференціях</p> <p>1 патент України</p>	<p>міжнародних конференціях</p> <p>1 патент України</p>
<p>№ 3. з 01.01.2021 по 31.12.2021</p>	<p><i>1 квартал</i> Дослідження ефектів комбінованої електромагнітної взаємодії в планарних немінімально-фазових фільтрах високого порядку.</p> <p>Каскадне з'єднання немінімально-фазових фільтрів третього порядку.</p> <p><i>2 квартал</i> Каскадне з'єднання немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку.</p> <p><i>3 квартал</i> Загальний випадок каскадного з'єднання немінімально-фазових фільтрів.</p> <p><i>4 квартал</i> Створення теорії планарних немінімально-фазових фільтрів зі змішаними зв'язками.</p>	<p>Особливості частотних характеристик при каскадуванні немінімально-фазових фільтрів третього порядку.</p> <p>Особливості частотних характеристик при каскадуванні немінімально-фазових фільтрів четвертого порядку.</p> <p>Загальні закономірності формування частотних характеристик планарних немінімально-фазових фільтрів.</p> <p>Методика побудови</p>	<p>Розроблено методичку побудови планарних немінімально-фазових фільтрів шляхом каскадування. Оpubліковано 4 розділи монографій за темою досліджень.</p> <p>3 статті в журналі, що фіксуються в Scopus.</p> <p>4 статті у фахових виданнях та міжнародних конференціях</p> <p>1 патент України</p>

		планарних немінімально- фазових фільтрів шляхом каскадування.  Рукопис монографії «Планарні смуго- пропускаючі фільтри зі змішаними зв'язками»  1 стаття в журналі, що фіксуються в Scopus.  1 стаття у фахових виданнях та міжнародних конференціях  1 патент України	
--	--	--	--

3.2. Визначити, чи одержане нове знання та нове розуміння предмету дослідження, і сформулювати, у чому саме вони полягають. Розкрити зміст одержаного знання у вигляді детального представлення нових положень, суджень. Докладно розкрити форми одержаних результатів – навести описи теорій, концепцій, закономірностей, моделей, властивостей, механізмів які створено, змінено та/або доповнено у роботі.

За результатами НДР створена нова методологія побудови планарних немінімально-фазових фільтрів зі змішаними зв'язками, яка ґрунтується на розрахункових формулах, що включають коефіцієнти зв'язку. Це відноситься до три-і чотирирезонаторних фільтрів, а також до фільтрів з більшим числом резонаторів, отриманих каскадним з'єднанням.

Застосування електромагнітної взаємодії між резонаторами змішаного характеру є новим. Дослідження електромагнітної взаємодії в таких структурах є комплексним і складається з декількох складових. Комп'ютерне моделювання дає можливість дослідити ефекти електромагнітної взаємодії в планарних структурах: смужкових; квазісмужкових; мікросмужкових.

3.3. Визначити, які із результатів і як само були науково обґрунтовані та доведені, як вони пов'язані із закономірностями організації та розвитку природи, суспільства людини, їх взаємозв'язків. Чи є одержані результати достатньо надійними для різних контекстів застосування та використання?

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 використовуватися додаткові перемички між несуміжними резонаторами. Такі фільтри є дуже компактними.

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). Раніше розроблені 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 же розроблено методики, які відображають кількісні співвідношення, що дозволяє заздалегідь передбачати характеристики і реалізовувати їх.

3.4. Довести наукову новизну результатів на основі їх змістовного порівняння з існуючими аналогами у світовій науці, посилаючись на конкретні публікації. Список цих публікацій навести у Додатку 1 до цього Анотованого звіту. Довести переваги отриманих наукових результатів над аналогами, розмежуватись із суміжними науковими напрацюваннями світової спільноти вчених.

Теорія планарних фільтрів найбільш повно викладена в монографії [1]. Значну частину цієї теорії становлять немінімально-фазові фільтри, опис яких базується на математичному апараті матриці зв'язків  $[m]$ , вперше запропонованому А.Е. Atia і А.Е. Williams в [2]. Матриця  $[m]$  отримана з матриці опорів  $[Z]$  або матриці провідності  $[Y]$ , які, в свою чергу, є наслідком законів Кірхгофа для електричних ланцюгів з двополюсними елементами. Матриця  $[m]$  придатна для опису смуго-пропускаючих фільтрів з резонаторами відбивного типу, які пов'язані між собою чисто електричними або магнітними зв'язками. Опис фільтрів за допомогою матриці  $[m]$  має два дуже істотних обмеження. Її дія не поширюється на фільтри з резонаторами прохідного типу, які, поряд з явищем резонансу, здійснюють трансформацію опорів. Нами вперше показано, як треба модифікувати цю матрицю, щоб вона могла описувати фільтри з резонаторами прохідного типу.

У роботах [3, 4] були розглянуті три - і чотирирезонаторні фільтри зі змішаними зв'язками між суміжними резонаторами. Була використана лінійна форма уявлення змішаного зв'язку. Передбачалося, що нахил цієї лінійної залежності в частотній області може бути як додатним, так і від'ємним. Нами вперше доведено у загальному вигляді, що нахил зазначеної залежності може бути лише від'ємним. Це формулюється як умова фізичної можливості змішаного зв'язку.

На особливу увагу заслуговують роботи [5-8], в яких змішані зв'язки використовуються в якості перехресних, за рахунок чого досягаються нові ефекти.

В [5, 6] розглянуто трирезонаторні фільтри, які мають два нуля передачі (полюса згасання) на дійсних частотах. Нами вперше визначено повний набір різних розміщень двох нулів передачі таких фільтрів. Виявилось, що кількість таких розміщень дорівнює 10.

В роботах [7, 8] розглянуто чотирирезонаторні фільтри зі змішаним перехресним зв'язком.

Один з них [7] мав три нулі передачі, а інший [8] мав постійний час затримки і правосторонній нуль передачі. Нами вперше визначено повний набір різноманітних розміщень трьох нулів передачі фільтрів четвертого порядку зі змішаним перехресним зв'язком.

Виявилось, що кількість таких розміщень дорівнює 8. Встановлено також варіанти розміщення трьох нулів передачі, на які накладено заборону, тобто вони не є фізично здійсненними.

Результати робіт [5-8] показують, що при змішаному перехресному зв'язку фільтри мають більше нулів передачі, ніж при звичайному зв'язку, а це дуже суттєво. Зазначена перевага повинна наростати в геометричній прогресії при каскадуванні фільтрів, що в літературі зовсім не освітлено. Наведені в [5-8] результати носять ілюстративний характер, вони отримані комп'ютерним ЕМ моделюванням, правомірним лише для певної конструкції фільтрів. У них не наведені універсальні формули, що виражають взаємозв'язок між параметрами фільтрів зі змішаними зв'язками, що дозволяло б проектувати такі фільтри на основі аналітичних залежностей. Врахований світовий досвід останніх років вказує на необхідність створення новітньої теорії немінімально-фазових фільтрів зі змішаними зв'язками, які можуть застосовуватися в багатьох сферах, включаючи військову. Даний проект спрямовано на вирішення фундаментальної наукової проблеми, що має загально світове значення, в тому числі і для питання безпеки та обороноздатності країни.

#### **4. ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ (до 50 рядків)**

##### **4.1. Обґрунтувати цінність результатів для світової та вітчизняної науки та для продовження фундаментальних та/або прикладних досліджень.**

Призначення фільтрів у радіоапаратурі різноманітне: вони можуть застосовуватися у дуплексерах та мультиплексерах 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.

В військовій сфері такі фільтри 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.

Зараз найбільш примітною плямою на озброєнні Сухопутних військ є піхотні станції зв'язку, які перейшли у спадок Збройних Сил ще в часи Радянського Союзу. Вони занадто важкі і енергоємні, їх вага складає близько 14 кілограмів. Тому дуже доцільним було б спроектувати та виготовити перші фільтри, на основі новітньої теорії, саме для цього призначення. Надзвичайно актуальним є створення мініатюрних фільтрів наземної малогабаритної системи зв'язку дециметрового діапазону для сухопутних військ.

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.

Створена в рамках проекту теорія описує нові планарні фільтри перспективного напрямку подальшої мініатюризації смуго-пропускаючих фільтрів для засобів телекомунікацій. Отримані знання можуть бути використані для досягнення прогресу в теорії і практиці побудови фільтрів широкого і спеціального призначення. Ми сподіваємося, що теорію, створену в рамках даної НДР 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.

- 4.2. Довести цінність результатів для підготовки фахівців у системі освіти, зокрема фахівців вищої кваліфікації. Відокремити використання очікуваних результатів від науково-методичних завдань, що виконуються викладачами у межах їх основної педагогічної діяльності. Навести у Додатку 2 до цього Анотованого звіту теми досліджень магістрантів (студентів), аспірантів і докторантів, кількість місяців їх роботи за темою з оплатою.

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, чії дисертації близькі до завершення.

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

## 5. ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

*(зазначати виключно доробок, серед авторів яких 50% і більше належать до колективу виконавців, визначеного у Таблиці 9. Оцінюючи наукові праці на відповідність темі, меті, предмету та завданням дослідження, експерт має право не зараховувати їх у разі повної невідповідності).*

- 5.1. Перелік опублікованих статей в журналах, що індексуються у наукометричній базі Scopus та/або Web of Science Core Collection (WoS) (або Index Copernicus для суспільних та гуманітарних наук) відповідно до таблиці 2 (окремо за кожною наукометричною базою)

Таблиця 2

№ з/п	Повні дані про статті з веб-адресою електронної версії; <u>підкреслити</u> <u>прізвища авторів</u> , зазначених у списку виконавців	Наукометрична база даних
1.	<u>A. Zakharov</u> , “Transmission zeros of trisection and quadruplet bandpass filters with mixed cross coupling,” IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 69, no. , Part 1, pp. 89-100, Jan. 2021. DOI: 10.1109/TMTT.2020.3034663	Scopus <b>Q1</b>
2	<u>A. Zakharov</u> , M. Ilchenko, “Coupling coefficients between resonators in stripline combline and pseudocombine bandpass filters ,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 68, no. 7, pp. 2679-2690, Jul. 2020. DOI: 10.1109/TMTT.2020.2988866	Scopus <b>Q1</b>
3	<u>A. Zakharov</u> , <u>S. Rozenko</u> , <u>L. Pinchuk</u> , and <u>S. Litvintsev</u> , “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. DOI: <u>10.1109/LMWC.2021.3065394</u>	Scopus <b>Q1</b>
4	<u>A. Zakharov</u> , <u>S. Rozenko</u> , <u>S. Litvintsev</u> , and M. Ilchenko, " Trisection	Scopus

	bandpass filter with mixed cross-coupling and different paths for signal propagation," <i>IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.</i> , vol. 30, no. 1, pp. 12-15, Jan. 2020. DOI: <a href="https://doi.org/10.1109/LMWC.2019.2957207">10.1109/LMWC.2019.2957207</a>	<b>Q1</b>
5	<u>A. Zakharov</u> , <u>S. Litvintsev</u> , and M. Ilchenko, "Trisection bandpass filters with all mixed couplings," <i>IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.</i> , vol. 29, no. 9, pp. 592-594, Sep. 2019. DOI: <a href="https://doi.org/10.1109/LMWC.2019.2929650">10.1109/LMWC.2019.2929650</a> .	Scopus <b>Q1</b>
6	<u>A. Zakharov</u> , <u>S. Rozenko</u> , <u>S. Litvintsev</u> , and M. Ilchenko, "Hairpin resonators in varactor-tuned microstrip bandpass filter," <i>IEEE Trans. Circuits Syst. II: Exp. Briefs</i> , vol. 67, no. 10, pp. 1874-1878, Oct. 2020. DOI: <a href="https://doi.org/10.1109/TCSII.2019.2953247">10.1109/TCSII.2019.2953247</a>	Scopus <b>Q1</b>

Анотації статей українською мовою, які представляють основні результати дослідження, навести у Додатку 3 до цього Аногованого звіту.

- 5.2. Перелік опублікованих за темою англійських статей та тез доповідей у матеріалах міжнародних конференцій, що індексуються у наукометричній базі Scopus або WoS (або Index Copernicus для суспільних та гуманітарних наук) відповідно до таблиці 3 (окремо за кожною наукометричною базою)

Таблиця 3

№ з/п	Повні дані про статті та тези доповідей з веб-адресою електронної версії; <u>підкреслити прізвища авторів</u> , зазначених у списку виконавців	Наукометрична база даних
1.	<u>S. Litvintsev</u> , <u>S. Rozenko</u> , "Synthesis of transmission line dual-mode resonator and filter with increased stopband and reduced dimensions," in <i>2021 IEEE XXVIth International Seminar/Workshop Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)</i> , 2021, pp. 116–120. <a href="https://ieeexplore.ieee.org/document/9552287">https://ieeexplore.ieee.org/document/9552287</a>	Scopus
2	<u>S. Litvintsev</u> , <u>S. Rozenko</u> , "Synthesis of dual-band filter with improved functionality based on dual-mode resonator," in <i>2021 IEEE XXVIth International Seminar/Workshop Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)</i> , 2021, pp. 121–125. <a href="https://ieeexplore.ieee.org/document/9552281">https://ieeexplore.ieee.org/document/9552281</a>	Scopus
3	<u>S. Litvintsev</u> , <u>S. Rozenko</u> , "Comblined bandpass filter with asymmetric frequency response and extended stopband," in <i>2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)</i> , 2021, pp. 105–110. DOI: <a href="https://doi.org/10.1109/UKRCON53503.2021.9575923">10.1109/UKRCON53503.2021.9575923</a>	Scopus
4	<u>S. Litvintsev</u> , <u>S. Rozenko</u> , <u>L. Pinchuk</u> , G. Avdeyenko, "Method of stopband expansion for pseudocomblined bandpass filters," in <i>2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)</i> , 2020, pp. 630–634, doi: <a href="https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252658">https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252658</a> .	Scopus
5	<u>S. Litvintsev</u> , <u>S. Rozenko</u> , <u>L. Pinchuk</u> , G. Avdeyenko, "Stopband expansion of comblined bpf," in <i>2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)</i> , 2020, pp. 668–671, doi: <a href="https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252757">https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252757</a> .	Scopus
6	<u>Zakharov A.</u> , <u>Rozenko S.</u> , <u>Litvintsev S.</u> , <u>Pinchuk L.</u> "Stripline bandpass filter with high permittivity dielectric". The Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019) 9–13 September 2019 Odessa, Ukraine. DOI: <a href="https://doi.org/10.1109/UkrMiCo47782.2019.9165415">10.1109/UkrMiCo47782.2019.9165415</a>	Scopus

7	<u>Zakharov A., Rozenko S., Litvintsev S., Pinchuk L.</u> “Microstrip bandpass filter with mixed couplings and resonators located at different levels”. The Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo’2019) 9–13 September 2019 Odessa, Ukraine. <b>DOI:</b> <a href="https://doi.org/10.1109/UkrMiCo47782.2019.9165485">10.1109/UkrMiCo47782.2019.9165485</a>	Scopus
---	---	--------

- 5.3. Перелік опублікованих статей, у журналах що входять до переліку фахових видань України (*окремо статті у журналах, що рекомендовані секціями Наукової ради МОН*), а також статей у закордонних журналах, які не увійшли до підпунктів 1 і 2 пункту 5, та охоронних документів на об’єкти права інтелектуальної власності відповідно до таблиці 4

Таблиця 4

№	Повні дані про статті з веб-адресою електронної версії, або вихідні дані про охоронні документи; <u>підкреслити прізвища авторів</u> , зазначених у списку виконавців
1	<u>A. Zakharov, S. Litvintsev,</u> 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. DOI: <a href="https://doi.org/10.1109/TCSII.2019.2922429">10.1109/TCSII.2019.2922429</a> <b>Scopus, Q1</b>
2	<u>A. Zakharov, S. Rozenko,</u> and M. Ilchenko, “Varactor-tuned microstrip bandpass filter with loop hairpin and compline resonators,” IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs, vol. 66, no. 6, pp. 953-957, Jun.2019. DOI: <a href="https://doi.org/10.1109/TCSII.2018.2873227">10.1109/TCSII.2018.2873227</a> <b>Scopus, Q1</b>
3	<u>A.V. Zakharov, S.N. Litvintsev, S.A. Rozenko,</u> “Distributed resonators from comparable sections of transmission line”, Radioelectronics and Communications Systems, 2021, vol. 64, no. 3, pp. 107–124. Q4 DOI: <a href="https://doi.org/10.3103/S0735272721030018">https://doi.org/10.3103/S0735272721030018</a> <b>Scopus, Q4</b>
4	<u>A.V. Zakharov, S.A. Rozenko</u> and S.N. Litvintsev «Fourth-order microstrip band-pass filter with mixed cross-coupling», Journal of Communications Technology and Electrics, vol. 66, no. 2, pp. 211-219. 2021. DOI: <a href="https://doi.org/10.1134/S1064226921020157">10.1134/S1064226921020157</a> . <b>Scopus, Q3</b>
5	<u>A. Zakharov, S. Rozenko, S. Litvintsev, L.S. Pinchuk</u> “Microstrip BPFs with increased selectivity and asymmetric frequency responses». Radioelectronics and Communications Systems, 2020, Vol. 63, no 7, p. 353-367. DOI: <a href="https://doi.org/10.3103/S0735272720070031">https://doi.org/10.3103/S0735272720070031</a> <b>Scopus Q4</b>
6	<u>Alexander V. Zakharov, Sergii N. Litvintsev, Ludmila S. Pinchuk.</u> Using coupling matrix in band-pass filters design. Radioelectronics and Communications Systems. Vol. 62, no. 4, pp. 161-172. April 2019. DOI: <a href="https://doi.org/10.3103/S0735272719040022">https://doi.org/10.3103/S0735272719040022</a> . <b>Scopus, Q3</b>
7	<u>A.V. Zakharov, S.A. Rozenko,</u> “Microstrip spurious-coupling band-pass filters with quarter-wavelength and П-shaped resonators”. Journal of Communications Technology and Electronics. <b>2019</b> , Vol. 64, No. 4, pp. 430-438. doi: <a href="https://doi.org/10.1134/S1064226919040120">10.1134/S1064226919040120</a> . <b>Scopus, Q2</b>
8	<u>A.V. Zakharov, S.A. Rozenko,</u> “Microstrip tunable bandpass filters with combined resonators”. Journal of Communications Technology and Electronics. 2019, Vol. 64, No. 3, pp. 271-277. doi: <a href="https://doi.org/10.1134/S1064226919030239">10.1134/S1064226919030239</a> . <b>Scopus, Q2</b>
9	<u>M. Litvintsev, A. V. Zakharov,</u> «Expansion method of bandstop for compline bandpass filters», Visnyk NTUU KPI Seria – Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia, no. 79 (2019), pp. 16-23. DOI: <a href="https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.79.16-23">10.20535/RADAP.2019.79.16-23</a> . <b>WoS.</b>
10	Патент на корисну модель «Смуго-пропускаючий решітчастий фільтр», № 146716 від 10.03.2021, Бюл. № 10. Автори <u>О.В. Захаров, С.О. Розенко, С.М. Літвінцев, Л.С. Пінчук.</u>
11	Патент на корисну модель «Смуго-пропускаючий гребінчастий фільтр», № 145151 від

	26.11.2020, бюл. № 22. Автори <u>О.В. Захаров</u> , <u>С.О. Розенко</u> , <u>С.М. Літвінцев</u> , <u>Л.С. Пінчук</u> .
12	Патент на корисну модель «Мікросмужковий смугопр пропускаючий фільтр», № 135153, опубл. 25.06.2019 бюл. № 12. Автори <u>Захаров О.В.</u> , <u>Ільченко М.Ю.</u> , <u>Літвінцев С.М.</u> , <u>Пінчук Л.С.</u>
13	<u>S. Litvintsev</u> , <u>L. Pinchuk</u> , «Transmission line dual-mode T-shaped resonator with all short-circuited ends», 5th International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2021) Nov. 2021 Kyiv, Ukraine.

## 5.4. Перелік опублікованих монографій відповідно до таблиці 5

Таблиця 5

№ з/п	Повні дані про монографії; <u>підкреслити прізвища авторів</u> , зазначених у списку виконавців
1.	<i>Розділ монографії <u>A. Zakharov</u>, М. Ilchenko, <u>S. Rozenko</u>, <u>L. Pinchuk</u>, Book Chapter: “Planar bandpass filters with mixed couplings”. <i>Lecture Notes in Networks and Systems</i>. 2021, 152, с. 377-393, <b>1.381 д/а</b>.</i>
2.	<i>Розділ монографії <u>A. Zakharov</u>, “Parametric and structural-parametric synthesis of nonuniform transmission line resonators,” <i>IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers</i>, vol. 68, no. 3, pp. 1055-1067, Mar. 2021. <b>Scopus, Q1, 1.245 д/а</b>.</i>
3	<i>Розділ монографії <u>A. Zakharov</u>, М. Ilchenko, “Circuit function characterizing tunability of resonators,” <i>IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers</i>, vol. 67, no. 1, pp. 98-107, Jan. 2020. <b>Scopus, Q1, 0.957 д/а</b>.</i>
4	<i>Розділ монографії <u>A. Zakharov</u>, М. Ilchenko, “Unloaded quality factor of transmission line resonators with capacitors,” <i>IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers</i>, vol. 67, no. 7, pp. 2204-2215, Jul. 2020. <b>Scopus, Q1, 1.149 д/а</b>.</i>
<b>Разом: 4.732 д/а</b>	

Анотації монографій українською мовою навести у Додатку 4 до цього Аногованого звіту.

## 5.5. Перелік опублікованих підручників, навчальних посібників, словників, довідників відповідно до таблиці 6

Таблиця 6

№ з/п	Повні дані про підручники, навчальні посібники, словники, довідників; <u>підкреслити прізвища авторів</u> , зазначених у списку виконавців
1.	-

## 5.6. Перелік захищених виконавцями проєкту дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук та кандидата наук відповідно до таблиці 7

Таблиця 7

№ з/п	Інформація про дисертацію
1.	-

Анотації дисертацій навести у Додатку 5 до цього Аногованого звіту.

## 5.7. Кількість грантів, за якими працювали виконавці дослідження, що фінансувались закордонними організаціями (з відповідним підтвердженням від закладу вищої освіти

(наукової установи), посиланням на сайт грантового проєкту або офіційним листом від грантодавця) відповідно до таблиці 8

Таблиця 8

№ з/п	ПІБ виконавців	Назва дослідження за грантом	Фінансування, тис. гривень
1.		-	

Короткий зміст (анотації) досліджень за грантами навести у Додатку 6 до цього Анотованого звіту.

**6. ВИКОНАВЦІ ДОСЛІДЖЕННЯ** (з оплатою в межах дослідження)  
(навести у текстовому та табличному відповідно до таблиці 9 вигляді)

- доктори наук: 1; кандидати наук: \_\_\_\_\_;
  - молоді вчені \_\_\_\_\_, з них кандидатів \_\_\_\_\_, докторів \_\_\_\_\_; докторантів: \_\_\_\_\_; аспірантів \_\_\_\_\_;
  - наукові працівники без ступеня 2;
  - інженерно-технічні кадри: 2, допоміжний персонал \_\_\_\_\_;
  - студенти \_\_\_\_\_.
- Р а з о м : 5

Таблиця 9

**Виконавці дослідження\*** (з оплатою в межах дослідження)

№ з/п	Прізвище, ім'я, по батькові	Науковий ступінь	Вчене звання	Посада і місце основної роботи	Вік
1	Захаров Олександр Віталійович	Доктор технічних наук	С.н.с	Провідний науковий співробітник НДІ телекомунікацій	74 роки 07.10.1947
2	Розенко Сергій Олександрович	Здобувач наукового ступеня PhD		Науковий співробітник НДІ телекомунікацій	44 роки 23.07.1977
3	Пінчук Людмила Світівна	-	-	Провідний інженер НДІ телекомунікацій	66 років 07.01.1955
4	Літвінцев Сергій Миколайович	Здобувач наукового ступеня кандидата технічних наук	-	Старший викладач кафедри радіоінженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського	53 роки 30.10.1968
5	Іванова Тетяна Львівна	-	-	Провідний інженер НДІ телекомунікацій	50 років 21.03.1971

\* вносяться дані про всіх виконавців за весь час виконання досліджень, окрім допоміжного персоналу та студентів

**7. Рішення науково-технічної ради** Науково-дослідного інституту телекомунікацій КПІ ім. Ігоря Сікорського від 30.11.2021 протокол № 6 щодо завершення дослідження

1. Констатувати відповідність результатів виконання науково-дослідної роботи календарному плану та технічному завданню.

2. Рекомендувати до розгляду Комісією приймання держбюджетних робіт КПІ ім. Ігоря Сікорського, остаточний звіт результатів д/б науково-дослідної роботи № 2213-Ф «Створення теорії та схемотехнічних рішень немінімально-фазових планарних фільтрів зі змішаними зв'язками для засобів телекомунікації».

**Керівник дослідження**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

О.В. Захаров \_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

**Проректор з наукової роботи**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

В.А. Пасічник \_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

**Додаток 1.** Список основних публікацій закордонних та вітчизняних вчених, на які посилаються автори для доведення наукової новизни власних результатів

№ з/п	Повні дані про публікації
1	J.-S. Hong. <i>Microstrip Filters for RF/Microwave Application</i> . 2nd Edition. John Wiley, 2011
2	A.E. Atia, A.E. Williams, R.W. Newcomb. Narrow-band multi-coupled cavity synthesis, <i>IEEE Trans. on Circuits and Systems</i> , CAS-21, No. 5, P. 649-655, 1974.
3	F. Zhu, W. Hong, J. Chen, and K. Wu, "Quarter-wavelength stepped-impedance resonator filter with mixed electric and magnetic coupling," <i>IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.</i> , vol. 24, no. 2, pp. 90–92, Feb. 2014.
4	S. Zhang, L. Zhu, and R. Weerasekera, "Synthesis of Inline Mixed Coupled Quasi-Elliptic Bandpass Filters Based on $\lambda/4$ Resonators," <i>IEEE Trans. Microw. Theory Tech.</i> , vol. 63, no. 10, pp. 3487–3493, Oct. 2015.
5	Xu Z.Q., Wang P., Liao J.X., Shi Y. Substrate integrated waveguide filter with mixed coupled modified trisections, <i>Electronics Letters</i> , Vol. 49, No. 7, P. 482-483, 2013.
6	C.-L. Hsu, C.-H. Yu, J.-T. Kuo, "Microstrip trisection filters with quasi-elliptic and flat group delay responses," in 2013 4th <i>Internat. High Speed Intelligent Commun. Forum</i> , 2013, pp. 1-2.
7	K. Gong, W. Hong, Y. Zhang, P. Chen, and C. J. You, "Substrate integrated waveguide quasi-elliptic filters with controllable electric and magnetic mixed coupling," <i>IEEE Trans. Microw. Theory Tech.</i> , vol. 61, no. 10, pp. 3071–3078, Oct. 2013.
8	L. Szydlowski, N. Leszczynska, M. Mrozowski. "A Linear Phase Filter in Quadruplet Topology With Frequency-Dependent Couplings," <i>IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.</i> vol. 24, no. 1, pp. 32-34, Jan. 2014.

**Додаток 2.** Дані про магістрантів (студентів), аспірантів і докторантів, які працювали за темою з оплатою праці

№ з/п	ПІБ	Статус	Назва досліджень	Кількість місяців роботи з оплатою
1.				

**Додаток 3.** Анотації українською мовою статей, що наведені у Таблиці 2

№ з/п	Назви статей та їх анотації
1.	У цій статті вирішено зворотну задачу для трисекційних і квадруплетів смугопропускаючих фільтрів (СПФ) зі змішаним перехресним зв'язком. Це дозволяє для заданого розміщення нулів передачі та відомих основних коефіцієнтів зв'язку визначити змішаний перехресний зв'язок $K = K_m + K_e$ , що містить магнітні та електричні компоненти. На основі отриманого рішення встановлено, що трисекційний СПФ має десять різних варіантів розміщення двох нулів передачі на комплексній площині $S = \sigma + j\Omega$ . Показано, що розглянуті трисекційні та квадруплети СПФ можуть мати нуль передачі другого порядку на осі $j\Omega$ , що забезпечує більш глибокий полюс загасання на кривій внесених втрат. За допомогою отриманого розв'язку зворотної задачі встановлюються деякі обмеження щодо можливих варіантів розміщення трьох нулів передачі квадруплета СПФ із змішаним перехресним зв'язком $K_{14}$ . Виявлено, що для отримання плоскої групової затримки нулі передачі повинні розташовуватися в $S$ -площині по кутах рівнобедреного

	<p>трикутника, вершина якого лежить на осі <math>j\Omega</math>, а сторони перетинають вісь <math>\sigma</math>. У цьому випадку, крім плоскої групової затримки, крива вносимих втрат має полюс затухання. Теоретичні результати підтверджуються двома мікросмужковими трисекційними СПФ та одним смужковим квадруплетом СПФ.</p>
2	<p>У цій статті розглядаються закономірності коефіцієнтів зв'язку між смужковими резонаторами в гребінчастих і псевдогребінчастих структурах. Встановлено, що між <math>\lambda/4</math> (<math>\lambda/2</math>) резонаторами в таких структурах існує електромагнітний (ЕМ) зв'язок, і вони є смуго-пропускаючими фільтрами (СПФ). Між смужковими східчато-імпедансними резонаторами (SIR) можуть бути реалізовані як додатні, так і від'ємні змішані зв'язки. Цей зв'язок може сильно варіюватися, змінюючи форму резонаторів і зазор між ними. Причому налаштування зв'язку здійснюється без використання провідного штифта, як у випадку мікросмужкових резонаторів. Досліджено закономірності зміни коефіцієнтів зв'язку між смужковими SIR на вищих резонансних частотах. Ці зміни мають хвилеподібний (черговий) характер. Ефект переходу коефіцієнта зв'язку через нуль може бути використаний для розширення смуги загородження СПФ шляхом придушення найближчої паразитної смуги пропускання. Встановлено, що коефіцієнти зв'язку між смужковими резонаторами, усі бічні поверхні яких металізовані, залежать лише від геометричних параметрів і не залежать від діелектричної проникності <math>\epsilon_r</math>. Діелектрична проникність лише переміщує частоти зв'язку ізольованої смужкової структури, зберігаючи при цьому співвідношення між цими частотами. Наведено дані вимірювань для деяких гребінчастих та псевдогребінчастих смужкових СПФ.</p>
3	<p>Ця стаття встановлює аналітичний зв'язок між двома нулями передачі та коефіцієнтами зв'язку трисекційних смуго-пропускаючих фільтрів (СПФ) зі змішаним перехресним зв'язком <math>K_{13} = K_m + K_e</math>. Цей СПФ має плоску групову затримку або квазіеліптичну частотну характеристику. Рівновіддалене розташування нулів передачі на осі <math>\sigma</math> (<math>\sigma_2 = -\sigma_1</math>) або осі <math>j\Omega</math> (<math>j\Omega_2 = -j\Omega_1</math>) комплексної площини <math>S = \sigma + j\Omega</math> призводить до виконання умови <math>K_m =  K_e </math> (<math>K_{13} = 0</math>). Зближення нулів передачі супроводжується збільшенням компонентів <math>K_m =  K_e </math>. Запропоновано мікросмужкові трисекційні СПФ з обговорюваними частотними характеристиками.</p>
4	<p>У цій статті обговорюються нові моделі симетричного трисекційного смуго-пропускаючого фільтра (BPF) з півхвильовими резонаторами відбиття, змішаним перехресним зв'язком та різними шляхами поширення сигналу. У фільтрі використовуються різні координати провідного підключення навантажень до кінцевих півхвильових резонаторів. Це призводить до різних шляхів сигналу від входу до виходу фільтра. Через різні підключення навантажень і змішаний перехресний зв'язок, що задовольняє умові <math>K_{13} = 0</math>, один і той же фільтр має різні частотні характеристики. Коли ми використовуємо одну позицію портів, генеруються два нулі передачі, розташовані на осі <math>\sigma</math> комплексної площини <math>s = \sigma + j\Omega</math>, і ми отримуємо рівну групову затримку. Якщо використовується інша позиція портів, на осі <math>j\Omega</math> генеруються два нулі передачі, <math>\Omega = (\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)/FBW</math>, і відображається квазіеліптичний відгук. В обох випадках два нулі передачі рівновіддалені відносно <math>s = 0</math>, і вони контролюються змішаним коефіцієнтом зв'язку. Наведено результати вимірювань та моделювання.</p>
5	<p>У цій статті розглядаються нові моделі симетричних трисекційних смуго-пропускаючих фільтрів (BPF) двох типів з усіма змішаними зв'язками. Розглядається умова, за якої фільтр першого типу з центральним резонатором відбиваючого типу перетворюється на фільтр лінії затримки. Фільтр другого типу з центральним прохідним резонатором стає квазіеліптичним фільтром за тих же умов. В результаті два нулі передачі</p>

	розташовані на однаковій відстані відносно $s = 0$ на комплексній площині $s$ . Положення цих нулів передачі відносно $s = 0$ виражається через змішані коефіцієнти зв'язку. Запропоновано, виготовлено та виміряно два компактних мікросмужкових трисекційних BPF різних типів з усіма змішаними зв'язками.
6	Вперше отримано резонансні рівняння для двох перестроюваних симетричних hairpin резонаторів із короткозамкненими кінцями. Розглядається випадок, коли до середини цих резонаторів підключена паралельна або послідовна змінна ємність. Встановлено, що непарні резонансні частоти таких резонаторів не залежать від величини змінної ємності і є постійними. Розглядаються також два традиційних симетричних шпилькових резонатора з відкритими кінцями, до яких підключені один або два змінних конденсатора. Отримано нові резонансні рівняння шпилькового резонатора з двома конденсаторами, де відрізок однорідної лінії передачі замінено відрізком нерівномірної лінії передачі. Для всіх чотирьох шпилькових резонаторів досліджено залежність відношення резонансних частот $f_i/f_0$ від електричної довжини резонаторів. Встановлено, що найбільше співвідношення $f_i/f_0$ мають два шпилькових резонатора: резонатор з двома короткозамкненими кінцями і паралельно підключеною ємністю, і петлевий резонатор з двома відкритими кінцями, з'єднаними змінною ємністю. Ємність першого резонатора в чотири рази перевищує ємність другого резонатора, тому його доцільно використовувати на більш високих частотах. Другий резонатор найбільш придатний для використання на нижчих частотах. На основі цього резонатора розроблено вузькосмуговий (2,4%) смуго-пропускаючий фільтр (СПФ) четвертого порядку, налаштований в діапазоні частот 225-400 МГц. Завдяки широкій смузі режекції досягається ослаблення більше 40 дБ при $3f_0$ у всьому діапазоні налаштування.

#### Додаток 4. Анотації українською мовою монографій, що наведені у Таблиці 5

№ з/п	Назви монографій та їх анотації
1.	Розглянуто задачу проектування смужкових і мікросмужкових смуго-пропускаючих фільтрів зі змішаним зв'язком, що включає магнітну та електричну складові взаємодії. Показано, що нуль передачі, який відповідає змішаним коефіцієнтам зв'язку, можна зсунути вздовж осі частоти шляхом зміни форми ступінчастих резонаторів. Підтверджується, що $N$ -резонаторні планарні фільтри можуть мати $(N - 1)$ нулі пропускання. Запропоновано конструкції мікросмужкових фільтрів з комбінованим зв'язком, які включають змішаний зв'язок та традиційно застосовуваний магнітний та електричний зв'язок. Показано, що кількість нулів пропускання таких фільтрів менше, ніж у фільтрів лише зі змішаним зв'язком, але їх проектування та налаштування менш трудомісткі. Наведено дані експерименту та комп'ютерного моделювання.
2	У цій роботі розглядаються методи параметричного та структурно-параметричного синтезу резонаторів, які містять відрізки лінії передачі однакової довжини. Ці методи дозволяють оптимізувати резонатори різної конфігурації з різним числом сегментів $N$ і характеристичним імпедансом $Z_{0i}$ . Ми будемо називати резонатори оптимальними, якщо вони мають мінімальне співвідношення $m = Z_{0\max} / Z_{0\min}$ при заданому співвідношенні між критичними частотами (полюсами і нулями вхідного опору). Вхідні імпеданси розглянутих резонаторів при частотній змінній Річардса $S$ описуються функціями реактивного опору $N$ ступеня: $Z^N(S)$ . Параметричний синтез відноситься до східчасто-імпедансних резонаторів (SIR). Структурно-параметричний синтез відноситься до резонаторів більш загального вигляду, які містять розімкнуті та короткозамкнені кінці.

	<p>Методи, які базуються на двох станах, встановлені у цій роботі: порядок функції реактивного опору <math>Z^N(S)</math> має бути мінімально можливим (<math>N = N_{\min}</math>) для реалізації необхідного співвідношення між певними критичними частотами; характеристичні імпеданси складених секцій <math>Z_{0i}</math> приймають лише два значення <math>Z_{0\min}</math> або <math>Z_{0\max}</math>. Ці методи були використані для синтезу різних резонаторів, корисних для практичного застосування. За допомогою структурно-параметричного синтезу синтезуються резонатори більш складної конфігурації, які значно перевищують SIR. Наведено результати вимірювань та моделювання.</p>
3	<p>У даній роботі досліджується функція чутливості резонансних частот до зміни ємності в резонаторах з ємнісною перебудовою, яка характеризує локальну перебудову. Ця функція є схемною функцією, подібною до функцій входу та передачі. Визначено особливості функції чутливості, що призводять до збільшення перебудовуваності. Основні особливості використовуються для побудови резонаторів із відрізків ліній передачі з розширеним діапазоном налаштування. Визначено обмеження перестройки резонаторів, що перестроюються одним або кількома конденсаторами. Синтезовані резонатори лінії передачі можна використовувати в перестроюваних смуго-пропускаючих фільтрах. Вони дозволяють налаштувати фільтр у більш широкому діапазоні частот для заданої зміни ємності <math>C_{\max}/C_{\min}</math>. Якщо вказано діапазон налаштування, фільтр виконуватиме налаштування з меншим співвідношенням <math>C_{\max}/C_{\min}</math>. Це призводить до меншої зміни внесених втрат фільтра в заданому діапазоні частот.</p>
4	<p>Дана робота містить аналітичні вирази, що дозволяють розрахувати ненавантажену добротність <math>Q_u</math> резонаторів лінії передачі з одним або кількома конденсаторами. Ці вирази включають добротність лінії передачі <math>Q_1</math> і конденсатора <math>Q_C</math> і чутливість <math>S_C</math> основної резонансної частоти <math>\omega_0</math> резонатора до малих змін ємності. Функція чутливості <math>S_C(\omega)</math> є схемною функцією, яка подібна до функцій входу та передачі. Аналіз на основі цих формул розширив розуміння характеру ненавантаженої добротності <math>Q_u</math> резонатора при зміні частоти. Показано, що за певних умов підключення до резонатора додаткових варакторів, не збільшує його ненавантажену добротність <math>Q_u</math>. При <math>Q_C \ll Q_1</math> значення <math>Q_u</math> чвертьхвильового резонатора з конденсатором зменшується зі збільшенням частоти. Встановлений вираз для розрахунку ненавантаженої добротності <math>Q_u</math> резонаторів з одним конденсатором дозволяє вирішити зворотну задачу та приблизно визначити добротність конденсатора <math>Q_C</math> за виміряними частотними характеристиками перестроюваних смуго-пропускаючих фільтрів. Представлено результати вимірювань.</p>

**Додаток 5.** Анотації захищених виконавцями дослідження дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук та кандидата наук, що наведені у Таблиці 7

№ з/п	Назви дисертацій та їх анотації
1.	

**Додаток 6.** Короткий зміст (анотації) досліджень за грантами, що наведені у Таблиці 8

№ з/п	Назви досліджень за грантом та їх анотації
1	

**Керівник дослідження**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

О.В. Захаров  
(ініціали, прізвище)