

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Оборжицького Валерія Івановича «Розвиток теорії та аналітичних методів підвищення ефективності проектування лінійних пасивних пристроїв для інтегрованих схем надвисокочастотного діапазону», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

Актуальність теми дисертації. За даними розробників програмного забезпечення для розробки активних пристроїв 70% часу фахівці у цій галузі витрачають на розробку та моделювання пасивних схем, хоча їх розрахунок у програмах моделювання здійснюється доволі швидко. Це вказує на нагальну потребу мати аналітичні методи розрахунку лінійних пасивних пристроїв. В системах зв'язку четвертого покоління використовують агрегацію частот – одночасну передачу інформації у двох і більше частотних діапазонах, що викликало попит на різноманітні двочастотні пристрої, які дозволяють отримати суттєву економію ресурсів у масових системах телекомунікацій. Пріоритетність і актуальність досліджень з побудови пасивних лінійних пристроїв узгоджуються із загальносвітовими тенденціями по удосконаленню електричних схем внаслідок масового застосування цих пристроїв у різних областях людської діяльності.

Створення нових зразків пасивних лінійних пристроїв з удосконаленими характеристиками та розвиток їх методів розрахунку ставить перед дослідниками комплекс проблем. Найважливішими з них є: вибір моделі опису кіл, яка повинна забезпечити потрібну точність; зручність використання та прозору інтерпретацію фізичних процесів; можливість мати не тільки механізм аналізу, але й вказівки на методи синтезу пристрою, виходячи з його узагальнених параметрів; також потрібна експериментальна перевірка висунутих наближень до точності розрахунку пристроїв.

Таким чином, тема дисертаційної роботи, метою якої є розвиток теорії розрахунку лінійних пасивних пристроїв для інтегрованих схем надвисокочастотного діапазону (НВЧ) з розробкою нових методів отримання їх параметрів та розробкою нових конструкцій пристроїв НВЧ діапазону, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась в рамках пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки, позначених Верховною радою і урядом України, в числі яких відмічено необхідність розробки ресурсозберігаючих технологій, створення конкурентоздатних зразків техніки в області мікроелектроніки і елементної бази систем зв'язку, телекомунікаційних та інформаційних систем. Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з науково-дослідницькими роботами, виконаними за участю претендента в національному університеті «Львівська політехніка» відповідно до координаційних планів науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки, серед них: «Розробка принципів побудови інтегрованих активно-пасивних засобів радіомоніторингу

мікрохвильового діапазону» (№ 0107U000827), «Розробка методологічних основ побудови адаптивних багато спектральних засобів спостереження в системах моніторингу і управління для розв'язку загальноінженерних і спеціальних задач» (№0110U001104); «Розробка засад застосування та обробки сигналів перспективних сенсорів для космічних апаратів і для наземних камер» (№0113U001355) та відповідає науковому напряму кафедри радіоелектронних пристроїв систем "Дослідження в галузі радіотехнічних систем мікрохвильового діапазону, багатоспектральних систем дистанційного зондування об'єктів і сцен, антен, антенних решіток та вузлів сантиметрового та міліметрового діапазонів радіохвиль».

Короткий аналіз змісту дисертаційної роботи. Дисертація складається з вступу, списку використаних скорочень, сімох розділів, висновків, списку використаних джерел і 8 додатків «А»-«З». Основний текст містить 306 сторінок і включає 110 рисунків, 10 таблиць. Список використаних джерел містить 437 найменувань на 48 сторінках. Додатки містять 112 сторінок.

У першому розділі проведено аналітичний огляд сучасних методів проектування лінійних взаємних пасивних пристроїв (ЛВП) високочастотного та надвисокочастотного діапазонів. Основну увагу приділено надвисокочастотним пристроям з кількістю портів більше двох: суматори потужності, спрямовані відгалужувачі, перемикачі, трансформатори імпедансу, фільтри. Також розглянуті фіксовані та дискретні фазообертачі. Огляд показує, що ці пристрої є об'єктом уваги у провідних наукових виданнях світу. Розгляд зосереджено на використанні наближення однієї робочої хвилі – одномодовому наближенню, яке дозволяє використовувати потужний математичний апарат теорії кіл, має просту фізичну інтерпретацію, але при цьому може бути наближено шляхом врахування неоднорідностей до доволі точного розрахунку реальних пристроїв. Одне з принципових протиріч використання такого наближення є робота в смузі частот, у аналітичному огляді на це також звертається увага. Також проводиться аналіз використання властивостей симетрії об'єктів, які розглядаються, і вказано на напрямки подальшого врахування цих властивостей.

У другому розділі наведено основні рівняння роботи, у яких розвинена теорія розрахунку вхідного комплексного коефіцієнту відбиття – S-параметрів пасивних пристроїв у випадку обчислення їх з використанням комплексних опорів на входах $2n$ -полосників. Отримано аналітичні співвідношення для розрахунку параметрів розсіяння симетричного багатополосника з використанням вхідних повних опорів (імпедансів) його парціальних складових підсхем синфазно-протифазного збудження. Ці вирази, розраховані за певних умов, дають набір готових рішень для випадків симетричних $2n$ -полосників. Але їх цінність не тільки у тому, що вони описують конкретні варіанти структур, а у тому, що вони дають вказівки на метод отримання потрібних залежностей імпедансу пристрою, що розраховується.

Аналогічний підхід до вирішення задачі побудови багатополосника для узгодження чи трансформації імпедансів, також дав змогу отримати умови на параметри багатополосника, за яких він зможе трансформувати активний опір у активний. Також розглянуто і загальний випадок довільного імпедансу.

Новим результатом є формулювання систематизованих за умовами симетрії співвідношень між імпедансами парціальних n -полюсників та параметрами розсіювання $2n$ -полюсника. Ці співвідношення поширено на принципи побудови суматорів потужності, фазообертачів та перемикачів. Також показано, як цей підхід може використовуватися для побудови двочастотних приладів.

У третьому розділі вивчаються симетричні чотирьохполюсники, які призначені для трансформації опору та створення потрібної фазової або часової затримки сигналу, побудова цих 4-полюсників ведеться фактично на базі 8-полюсників, з яких два порти з'єднані, або навантажені, що дає змогу значно розширити функціональні властивості пристроїв. Ці пристрої вивчаються не ізольовано, а в рамках єдиної концепції, що розглянута у розділі 2, тому вдалося систематизувати конструкції за особливостями навантаження для приведення їх до симетричного виду, що дозволило отримати вирази для їх електричних параметрів. На базі аналітичного розгляду цих симетричних чотирьохполюсників отримано вирази для пристроїв затримки сигналу та частотної режекції.

Новим результатом є аналітичні співвідношення для різних варіантів навантаження кінців зв'язаних ліній передачі, які з доповненням дискретних елементів можуть виконувати різні схемні функції: трансформатора імпедансу, схеми режекції сигналу, зсуву фази та затримки сигналу.

У четвертому розділі розглянуто побудову на основі симетричних структур суматорів потужності, в яких досліджено вплив конструктивних особливостей реалізації цих пристроїв при різних умовах, наприклад при поділі великої потужності, що вимагає більших розмірів балансних резисторів. Розглянуто довільний суматор на N -входів, для якого наведено метод розрахунку додаткових елементів для збереження симетрії поділу потужності та узгодження портів. Розраховано пристрої, які окрім поділу потужності, дозволяють розділити входи по постійному струму. Розглянуто спрямовані відгалужувачі на основі розвиненої теорії вхідних імпедансів та розраховано і експериментально перевірено декілька різновидів відгалужувачів. Універсальність теоретичного підходу продемонстровано на прикладі пристрою перетину двох мікросмужкових ліній та шлейфних відгалужувачів.

Новим результатом є аналітичні співвідношення для узагальненої схеми рівноплечого подільника з різними варіантами виконання, які розширюють можливості розрахунку нових конструкцій у рамках єдиного підходу; також вперше отримано аналітичні співвідношення для подільників, які виконують функції трансформатора імпедансу; отримано формули для різновидів спрямованих відгалужувачів.

У п'ятому розділі розглядаються перемикачі, які забезпечують підключення одного з каналів до генератора, у той час як інші залишаються відключеними, звідси, схема має бути взаємною. Розглянуто загальні співвідношення про узгодження такої схеми зі змінним станом та отримано аналітичні результати по розрахунку схеми з різними типами комутуючих елементів, наприклад з використанням

мікроелектронних електромеханічних схем (МЕМС). Розглянуто частотні характеристики перемикачів різного типу та вказано на методи з мінімізацією додаткових трансформуючих елементів, що позитивно впливає на електричні параметри перемикачів.

Новим результатом є удосконалення методу поетапної побудови структури перемикача з визначенням опорів навантаження, паразитних резонансів та трансформуючих чотириполюсників, які потрібні для реалізації заданих параметрів. При цьому обмеження параметрів стають зрозумілими при розрахунку кожного складового елемента схеми.

У шостому розділі проведено розгляд варіантів фазообертача, який може бути моделлю або складовою частиною багатьох пристроїв у високочастотній радіотехніці. На основі симетричних варіантів дискретних фазообертачів з відрізками ліній передачі проведено розгляд впливу реактивних паразитних елементів, методів їх компенсації для узагальнених типів елементів комутації. Проведено розрахунки фазообертачів з використанням $p-i-n$ діодів та МЕМС. Запропоновано нові варіанти фазообертачів, які можуть мати менші розміри, ніж традиційні та кращі електричні характеристики.

Новим результатом є отримання аналітичних співвідношень для значення зсуву фази та нахилу фазочастотної характеристики, що дає нові можливості розробникам радіоапаратури; запропоновано використовувати методику пошуку резонансних частот для попереднього аналізу перемикачів; розглянуто варіанти фазообертачів з використанням відрізків зв'язаних ліній.

У сьомому розділі розглядаються принципи побудови пасивних двочастотних пристроїв, таких, у яких потрібні електричні характеристики досягаються одночасно у двох частотних діапазонах. Такі пристрої потрібні для зменшення вартості, маси та габаритних розмірів сучасної радіоелектронної апаратури, зокрема у системах зв'язку 4 та більш нових поколінь. Топологічною відмінністю у цьому випадку є те, що структури можуть бути несиметричними, що веде до більш складного математичного апарату, який потрібно використовувати для обчислення електричних характеристик пристроїв та для синтезу схеми пристрою. Розглянуто побудову двочастотних трансформаторів опору, перемикачів, ежекторних фільтрів, смуго-пропускних фільтрів, спрямованих відгалужувачів та подільників потужності. Пристрої, розроблені на частоти діапазонів мобільного зв'язку, можуть вже зараз використовуватися при конструюванні апаратури.

Новим результатом є отримання демонстрації придатності для створення та розрахунку пристроїв уніфікованого підходу на основі методу вхідних імпедансів та принципів декомпозиції за методом синфазно-протифазного збудження; розробка аналітичних співвідношень для характеристик двочастотних приладів та самі конструкції приладів.

Додатки. Додатки А-Ж є частиною відповідно розділів 2-7, та розширюють їх фактологічну базу у частині обґрунтованості і новизни теорії та методів. Додаток З містить акти впровадження роботи.

Новизна наукових положень, висновків та рекомендацій. При вирішенні задач дослідження отримано ряд нових результатів, які охоплюють аспекти теорії роботи, методи розрахунку і принципи конструювання взаємних пасивних пристроїв, в тому числі з розподіленими сталими.

Сукупність отриманих результатів представляє значний розвиток теоретичних основ системного дослідження пасивних пристроїв і дозволяє виявляти нові закономірності їх функціонування, знаходити нові варіанти їх схемного і конструктивного рішення.

До основних наукових результатів слід віднести:

1. Встановлено в аналітичній формі зв'язок між параметрами розсіювання симетричного багатополюсника та ідеально спрямованого повністю симетричного восьмиполюсника з вхідними імпедансами їх парціальних складових синфазно-протифазного збудження, це дозволяє записати умови узгодження та розв'язки в термінах вхідних імпедансів, які розраховуються за робочими параметрами пристрою.

2. Виявлено нові закономірності та сформульовано правила стосовно можливої заміни вхідних імпедансів під час перестроювання симетричного багатополюсника, при яких його параметри розсіювання не змінюються, або змінюються тільки їх фази, але не змінюється розподіл потужності між його входами/виходами, що дозволило узагальнити підходи до розробки двочастотних пристроїв та запропонувати методи реалізації необхідних для цього двочастотних реактивних елементів.

3. Сформульовано нові умови допустимої реалізації дискретного прохідного фазообертача на базі симетричного чотиріполюсника, що дозволило встановити придатність схеми чотиріполюсника для реалізації фазообертача за розміщенням в ній ключів та для можливості запису аналітичних співвідношень.

4. Записано аналітичні співвідношення параметрів розсіювання для двох однакових зв'язаних смужкових ліній з різними варіантами навантаження з доповненням дискретними елементами, відрізком ліній між кінцями, під'єднаними шлейфами та відрізками одиночних ліній на входах, які встановлюють зв'язок між функціональним призначенням пристрою та вхідними опорами його парціальних складових, що дозволило отримати вирази для розрахунку параметрів різноманітних пасивних пристроїв на нові зв'язаних ліній – трансформаторів імпедансу, пристроїв затримки, режекторних фільтрів.

5. Отримано аналітичні співвідношення для розрахунку суматорів, перемикачів, приладів дискретного управління фазою сигналу, які дозволи отримати більш прості кінцеві вирази, спрощений порядок розрахунку, та кращі електричні параметри цих пристроїв, крім того, досліджено явище паразитних резонансів у закритих каналах перемикачів, що дозволило поліпшити електричні параметри перемикачів у розширеній смузі частот.

6. На основі уніфікованого методу розроблено двочастотні спрямовані відгалужувачі, полосно-смугові фільтри та подільники потужності, вони являють собою приклад доведеної до практичного використання теорії, яка розроблялась у

дисертаційній роботі, та можуть бути базою для розробки інших пристроїв обробки сигналів.

Практична цінність отриманих результатів. За результатами проведених теоретичних досліджень було створено набір правил для послідовного застосування методів синфазно-протифазного збудження, декомпозиції, синтезу та розрахунку характеристик для розробки пристроїв з заданими параметрами на основі використання властивостей симетрії, що створює додаткові можливості для розробників радіоапаратури. Велика кількість детально проаналізованих варіантів пристроїв, які розроблені на базі загальних положень роботи, складає базу знань по відповідному розділу теорії високочастотних пасивних пристроїв, що дають конструктивну основу розробки приймально-передавальної апаратури та засобів вимірювання у високочастотному та надвисокочастотному діапазонах. За наслідками проведених досліджень створено і запатентовано нові конструкції пасивних пристроїв з покращеними характеристиками в порівнянні з існуючими вітчизняними і зарубіжними аналогами. Такими є, простий, з одним каскадом двочастотний режекторний фільтр зі згасанням біля 20 дБ, двочастотні трансформатори імпедансу, смугові фільтри, суматори та спрямовані відгалужувачі, фільтри зі змінними робочими смугами, що мають прості конструкції та добрі електричні параметри, та інші пристрої.

Використання отриманих в дисертації результатів на практиці дозволить підвищити якість проектування при розробці нових перспективних радіотехнічних і телекомунікаційних систем мікрохвильового діапазону, а також дозволить поліпшити характеристики існуючих систем в процесі їх модернізації з використанням розроблених в дисертації конструкцій мікрохвильових пристроїв.

Пропозиції по використанню отриманих результатів. Отримані результати можуть бути використані в науково-дослідних інститутах, конструкторських бюро і учбових закладах, які займаються дослідженням, розробкою і вивченням радіотехнічної апаратури. Впровадити результати дисертації рекомендується в Харківському національному університеті радіоелектроніки, Донецькому національному університеті, науково-технічному центрі КП НПК «Іскра», в «Оризон-Навігація» і в інших учбових закладах і науково-дослідних організаціях.

За матеріалами дисертаційної роботи рекомендується підготувати монографію англійською мовою для захисту пріоритету проведених досліджень.

Достовірність і обґрунтованість наукових результатів. Достовірність і обґрунтованість наукових результатів, виводів і рекомендацій, отриманих в дисертаційній роботі, визначається: використанням апробованих методів теорії електричних кіл при вирішенні схемотехнічних завдань; обґрунтованим вибором наближень, врахуванням впливу неоднорідностей та розподіленого характеру конструктивних елементів, збігом результатів теоретичних і експериментальних досліджень; позитивним досвідом впровадження отриманих результатів в промисловості, що підтверджено актами про впровадження.

Оцінка змісту дисертації. Дисертація написана грамотно і науковою мовою, оформлена акуратно і відповідно до вимог, встановлених ВАК. Матеріал викладено

у логічному порядку і він переконує в достовірності теоретичних положень і експериментальних даних. Текст супроводжується необхідною кількістю таблиць і ілюстрацій. Наведено коректні посилання на літературні джерела.

Оцінка ідентичності змісту автореферату і основних положень дисертації. Структура автореферату ідентична структурі дисертації. Текст автореферату повною мірою відображає основні положення дисертації.

Повнота публікацій. Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень і конструкції розроблених пристроїв представлені в 23 статтях у фахових виданнях, з яких 5 статей включені до міжнародних баз даних а 1 стаття в зарубіжному науковому журналі, в 9 патентах України, в 32 тезах доповідей і матеріалах міжнародних конференцій.

Апробація роботи. Теоретичні і практичні результати роботи пройшли достатню апробацію на міжнародних конференціях, що проводяться в Україні і Польщі.

Автор дисертації є авторитетним фахівцем в області проектування пасивних схем НВЧ діапазону.

Впровадження роботи. Основне впровадження роботи проведено в НДКІ ЕЛВІТ (м. Львів) і СКБ ТВС (м. Львів), є акт впровадження в учбовий процес Національного університету «Львівська політехніка».

Недоліки і зауваження. Поряд із відзначеними досягненнями в дисертації є і недоліки. Основні з них такі:

1. У роботі не використовується такий засіб відображення результатів та розрахунку, як діаграма Сміта, її використання додало б наочності інтерпретації результатів.

2. У роботі застосовуються дискретні ємності у якості відповідних реактивних опорів, але не говориться, як отримано ці значення, бо на частотах, на яких проводиться вимірювання, ці дискретні елементи можуть мати суттєво інший імпеданс, ніж розрахований по номінальній ємності.

3. Не розглянуто питання збіжності ітераційного процесу пошуку коренів трансцендентних рівнянь у методах розрахунку пристроїв на відріжку зв'язаних ліній з одностороннім і двостороннім навантаженням та з боковими шлейфами, а також протиспрямованих відгалужувачів на відріжку зв'язаних ліній з боковими шлейфами.

4. На рис. 7.2 показано лише коефіцієнти відбиття, у той час як коефіцієнт передачі у деяких застосуваннях також є важливим.

5. Розглянуто приклади фазообертачів на зсув фази 90° , 45° та $22,5^\circ$ у той час як прилади на менші значення зсуву фази з потрібною точністю можуть бути більш складними для реалізації.

6. При постановці завдань на дослідження в роботі слід було вказати на використання припущень про безвтратність відрізків ліній передачі та про частотну незалежність їх хвильових опорів.

7. Чому не розглядався варіант комбінованого узгодження променевих перемикачів з трансформуючими чотиріполюсниками на їх вході і на виходах каналів?

8. У деяких місцях використання термінів «хвильові параметри багатополісників» затьмарює фізичний зміст процесу, доцільніше було б використовувати термін «параметри розсіювання багатополісника», є і інші невдалі вирази, наприклад «...вихідних значень параметрів відрізків», «... на частоту 2 ГГц з придушенням першої гармоніки на частоті 4 ГГц», аналогічно « без резонансів в районі першої гармоніки».

9. Мають місце деякі описки в тексті, наприклад, збій у нумерації висновків, «фотографії осцилограм» яких нема в додатку.

Приведені зауваження не є визначними і не знижують загальній рівень проведених досліджень.

Загальний вивід. Дисертація відповідає паспорту спеціальності, за яким вона подана до захисту (п. 1, 2, 4). Дисертація є закінченою науковою роботою, присвячена одній темі, в якій отримано нові наукові і практичні результати, що в сукупності вирішують актуальну і важливу наукову проблему вдосконалення теоретичних основ моделювання і розробки нових принципів конструювання пасивних мікрохвильових пристроїв.

Вважаю, що дисертаційна робота по своїй актуальності, новизні, практичній цінності і достовірності отриманих результатів повністю відповідає вимогам п. 10, 9 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567, а її автор, Оборжицький Валерій Іванович, заслуговує на присвоєння вченого ступеня доктора технічних наук за фахом 05.12.13 – радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій.

Офіційний опонент, д.т.н. професор,
професор кафедри радіофізики та кібербезпеки
Донецького національного
університету МОН України

Крижановський В.Г.

