

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені В. Н. КАРАЗІНА

БЕРДНИК СЕРГІЙ ЛЕОНІДОВИЧ

УДК 537.87:621.396.677

ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ КОМБІНОВАНИМИ
ВІБРАТОРНО-ЩІЛИННИМИ ВИПРОМІНЮЮЧИМИ СТРУКТУРАМИ
В ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄМАХ З ІМПЕДАНСНИМИ ГРАНИЦЯМИ

01.04.03 – радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук

Харків – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

**Науковий
консультант:**

доктор фізико-математичних наук, професор
Катрич Віктор Олександрович,
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна,
проректор з наукової роботи.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор
Просвірнін Сергій Леонідович,
Радіоастрономічний інститут НАН України (м. Харків),
головний науковий співробітник відділу теоретичної
радіофізики;

доктор фізико-математичних наук, професор
Куриляк Дозислав Богданович,
Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН
України (м. Львів),
провідний науковий співробітник відділу теорії
хвильових процесів та оптичних систем діагностики;

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Свеженцев Олександр Євгенович,
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова (м. Харків),
старший науковий співробітник відділу теорії дифракції
та дифракційної електроніки.

Захист відбудеться 11 травня 2021 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий 08 квітня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Юрій АРКУША

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У наш час у радіотехнічних і радіоелектронних комплексах різного призначення широко використовуються лінійні вібраторні та щілинні випромінювачі (й отвори зв'язку електродинамічних об'ємів), як у якості самостійних приймально-передавальних структур, так і елементів антенних систем і пристроїв антенно-фідерного тракту. Їхнє масове та різнофункціональне використання, включаючи багатoelementні структури, стало об'єктивною передумовою для розвитку теоретичних методів аналізу електродинамічних характеристик таких систем. Розширення елементної бази метрового, сантиметрового та міліметрового діапазонів довжин хвиль можливе при застосуванні як елементів випромінюючих структур комбінованих вібраторно-щілинних випромінюючих структур, зокрема розташованих в електродинамічних об'ємах з імпедансними границями та таких, що містять імпедансні вібратори зі змінним поверхневим імпедансом. Використання таких комбінованих магнітно-електричних випромінювачів і їх багатoelementних систем відкривають нові можливості для формування просторових розподілів полів із зазначеними параметрами в ближній і дальній зонах випромінювання, що може в значній мірі сприяти розширенню функціональних властивостей радіотехнічних і радіоелектронних пристроїв, а також дозволяє забезпечити розв'язання значного кола задач сучасної радіофізики для багатьох наукових напрямків досліджень і різних галузей застосування. Використання імпедансних структур дозволяє вирішити проблему мініатюризації випромінювачів.

Велика кількість наукових робіт (включаючи публікації авторів Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна) за останні десятиліття, що стосується досліджень тонких вібраторних і щілинних випромінювачів дозволила у своїй сукупності сформувати сучасну теорію таких випромінювачів, яка об'єднує як асимптотичні методи для розрахунків характеристик окремих елементів і числово-аналітичні підходи, що розвивають ці методи, так і прямі числові методи електродинамічного аналізу. Однак вважати електродинаміку лінійних вібраторних і щілинних випромінювачів, а також їх комбінованих вібраторно-щілинних структур закінченою теорією не є можливим. Насамперед, це пов'язано з подальшим розвитком сучасної техніки антенних систем і пристроїв антенно-фідерних трактів, який можна охарактеризувати такими основними вимогами практики: багатофункціональність; багатoelementність; інтеграція й модифікація структурних складових для мінімізації масогабаритних параметрів і забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) радіоелектронних засобів (РЕЗ); використання композитних і метаматеріалів; формування електромагнітних полів з необхідними просторово-енергетичними, поляризаційними та частотними характеристиками.

Однак у рамках розроблених числово-аналітичних методів не визначено способи розв'язання граничних задач для цілого класу перспективних для практичних застосувань комбінованих вібраторно-щілинних випромінюючих структур. Це насамперед: комбіновані випромінюючі вібраторно-щілинні структури в хвилевідних трактах з імпедансними вібраторними елементами (з нерегулярними геометричними й електрофізичними параметрами) всередині та зовні хвилеводу,

щілинні, вібраторні й комбіновані вібраторно-щілинні структури на сферичних поверхнях та у електродинамічних об'ємах з імпедансними поверхнями, хвилевідні зчленування з вібраторно-щілинними структурами в області зв'язку й імпедансними поверхнями, антенні решітки з імпедансними вібраторними та комбінованими вібраторно-щілинними елементами, тощо.

Тому **актуальною** є проблема подальшого розвитку теорії, створення математичних моделей та електродинамічних методів розрахунку частотно-енергетичних, частотно-просторових, поляризаційних характеристик полів комбінованих магнітно-електричних випромінюючих структур, що не потребують апіорних обмежень на їх геометричні та матеріальні параметри, параметри середовища їх розташування, а також проведення багатопараметричних досліджень процесів збудження, випромінювання та поширення електромагнітних хвиль у таких структурах, спрямованих на виявлення основних фізичних закономірностей формування випромінюваного електромагнітного поля, виробленню рекомендацій і наступне проєктування на цій основі нових або модернізації існуючих технічних пристроїв.

Фундаментальною *проблемою*, на вирішення якої спрямовано дослідження є розвиток теорії комбінованих випромінювачів магнітно-електричного типу, а також їх багатoelementних систем, побудова на основі інтегральних рівнянь макроскопічної електродинаміки фізично коректних математичних моделей для їхнього дослідження, розробка й узагальнення числово-аналітичних методів розв'язання відповідних крайових задач математичної фізики, що дозволяє провести строгий електродинамічний аналіз комбінованих структур, які складаються з електричних і магнітних випромінювачів, зокрема тонких імпедансних вібраторів (у загальному випадку з нерегулярними вздовж них геометричними й електрофізичними параметрами) і вузьких щілин у різних електродинамічних об'ємах, у тому числі й таких, які мають імпедансні границі. Вирішення зазначеної проблеми розкриває додаткові можливості для формування електромагнітних полів із заданими характеристиками у всіх зонах випромінювання, а також сприяє розвитку новітньої елементної бази антенно-хвилевідних пристроїв метрового, дециметрового та міліметрового діапазонів довжин хвиль, створенню нових або істотного поліпшення робочих характеристик діючих радіотехнічних і радіoeлектронних пристроїв для різних галузей застосування й обумовлює актуальність теми дисертаційної роботи та вибір напрямків досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є узагальненням результатів досліджень, проведених автором на кафедрі фізичної і біомедичної електроніки та комплексних інформаційних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за період з 2011 р. по 2021 р. Тематика роботи пов'язана із затвердженими Кабінетом Міністрів України пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки «Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави», «Фундаментальні дослідження у вищих навчальних закладах та наукових установах» і з пріоритетними напрямками фундаментальних наукових досліджень,

затвердженими Національною академією наук України та Міністерством освіти і науки України. Матеріали дисертації є складовими частинами держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР) (номери держреєстрації: 0111U002465 (2011-2013р.), 0114U002584 (2014-2016р.), 0117U004848 (2017-2019р.), 0110U001425 (2010-2012р.), 0112U006929 (2013-2015р.), 0116U000814 (2016-2018р.), 0115U000464 (2015-2017р.), 0117U004852 (2017-2019р.), 0119U002522 (2019-2020р.), 0118U002021 (2018-2020р.). Автор був науковим керівником 3 НДР і відповідальним виконавцем 3 НДР.

Мета і завдання дослідження. *Метою роботи є розвиток теорії комбінованих вібраторно-щілинних випромінюючих структур, побудова фізично коректних математичних моделей та удосконалення числово-аналітичних методів розв'язання відповідних крайових задач електродинаміки, які дозволяють провести теоретичний аналіз фізичних властивостей полів збудження (випромінювання, розсіяння) та функціональних характеристик комбінованих вібраторно-щілинних структур, що містять імпедансні вібраторні (у загальному випадку з нерегулярними геометричними й електрофізичними параметрами) та щілинні випромінювачі, а також їх багатоелементних систем, розташованих у різних електродинамічних об'ємах з імпедансними границями (включаючи покриття з метаматеріалу) та заповнених матеріальним середовищем.*

Основні задачі дослідження:

- розв'язання граничних задач електродинаміки для комбінованих вібраторно-щілинних структур, які складаються з імпедансних вібраторів (із довільними геометричними параметрами та живленням), хвилевідно-резонаторно-щілинних елементів, розташованих в електродинамічних об'ємах з ідеально провідними й імпедансними границями (включаючи покриття з метаматеріалу), з використанням у методах наведених електрорушійних сил (ЕРС), магніторушійних сил (МРС) і електро-магніторушійних сил (ЕМРС) для електричного та магнітного струмів випромінювачів асимптотичних виразів, отриманих методом усереднення;
- узагальнення принципів використання асимптотичних розв'язків інтегро-диференційних рівнянь щодо електричного та магнітного струмів у методі наведених ЕМРС щодо комбінованих вібраторно-щілинних структур;
- побудова фізично коректних математичних моделей комбінованих випромінюючих структур, складовими елементами яких є щілинні випромінювачі в стінці прямокутного хвилеводу й імпедансні вібратори (монополі), розташовані усередині та зовні хвилеводу; різного типу хвилевідних з'єднань з вібраторно-щілинними структурами в області зв'язку, діелектричними вставками й імпедансними поверхнями (включаючи покриття з метаматеріалу); вібраторно-щілинних структур на сферичних поверхнях; багатоелементних антенних решіток з імпедансними вібраторними, щілинними та комбінованими елементами;
- розв'язання задачі імпедансного синтезу для антенних решіток із тонких лінійних випромінювачів: імпедансних вібраторів і вузьких щілин;
- вивчення, електродинамічна інтерпретація й узагальнення фізичних закономірностей процесів збудження та формування електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними структурами, а також багатоелементними системами.

Об'єкт та предмет дослідження.

Об'єкт дослідження – фізичні процеси збудження, випромінювання та розсіяння електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними структурами, включаючи багатoelementні системи, в електродинамічних об'ємах з ідеально провідними й імпедансними границями.

Предмет дослідження – електромагнітні поля й багатопараметричні залежності їхніх характеристик (просторово-частотних, просторово-поляризаційних, частотно-енергетичних) від умов збудження, геометричних розмірів, а також матеріальних параметрів комбінованих вібраторно-щілинних випромінюючих структур і збуджуваних електродинамічних об'ємів.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач використано наступні методи: метод інтегральних рівнянь, метод функції Гріна, узагальнені методи наведених ЕРС, МРС і ЕМРС, метод усереднення, метод послідовних ітерацій, метод розкладання шуканої функції в ряд за степенями малого параметра, метод моментів, метод імпедансного синтезу антенних решіток.

Наукова новизна одержаних результатів роботи полягає в подальшому розвитку теорії комбінованих структур, що містять імпедансні вібраторні та щілинні випромінювачі, розробці й узагальненні фізично коректних і математично строгих числово-аналітичних методів розв'язання відповідних граничних задач електродинаміки, зокрема, застосування в узагальнених методах наведених ЕРС, МРС і ЕМРС асимптотичних розв'язків для струмів, отриманих асимптотичним методом усереднення. Розвинені методи є основою для проведення теоретичних досліджень комбінованих вібраторно-щілинних електродинамічних структур з новими фізичними та функціональними якостями. А саме:

- запропоновано нові аспекти в розвитку теорії електрично тонких випромінювачів: введено до електродинамічного аналізу електрично тонких випромінювачів нові поняття ефективних наведених імпедансів електричного та магнітного типів, що дозволило сформулювати струмові інтегральні рівняння для випромінювачів електричного та магнітного типів у дуально-симетричній формі. Розв'язано задачу конструктивної реалізації імпедансу магнітного типу;

- уперше розв'язано задачі збудження та випромінювання електромагнітних полів поперечною та поздовжньою щілинами в широкій стінці прямокутного хвилеводу, усередині та зовні якого розташовано вібратори (монополі) зі змінним уздовж них поверхневим імпедансом, з урахуванням повної взаємодії між усіма елементами вібраторно-щілинних структур. Визначено умови реалізації коефіцієнта випромінювання структури, близького до одиниці, керування частотними характеристиками. Визначено оптимальні параметри випромінювача типу Клевіна з імпедансними вібраторами при випромінюванні у півпростір над нескінченною площиною для формування полів із заданими характеристиками. Вперше отримано рівняння параметричного типу щодо визначення реактивного імпедансу настроювального монополя всередині хвилеводу для структури з поперечною щілиною, при якому забезпечується резонансний режим випромінювання;

- уперше розв'язано задачі збудження електромагнітних полів у хвилевідних зчленуваннях (трійниках) з вібраторно-щілинними структурами в області зв'язку прямокутних хвилеводів та імпедансним покриттям торця бічного плеча. Визначено

умови збільшення коефіцієнта передачі за потужністю в бічний хвилевід, поділу потужностей хвиль, що пройшли, у заданому співвідношенні на певній довжині хвилі всього робочого діапазону хвильоводу, умови рівного поділу потужності між хвилевідними модами в бічному хвилеводі (за умови його багатомодового функціонування) в інтервалах частот та між усіма фізичними каналами поділу потужності на окремих частотах при доброму узгодженні. Виявлено, що покриття торця бічного хвилевідного плеча метаматеріалом LR-5I, яке має частотно залежний різнотипний імпеданс забезпечує трьохрезонансний режим передачі потужності з основного хвильоводу в бічний;

- уперше розв'язано задачі збудження електромагнітних полів у хвилевідних зчленуваннях з діелектричними вставками й імпедансними поверхнями, де в якості бічних плечей пристроїв розглянуто Т-орієнтований напівнескінченний хвилевід з імпедансним торцем; напівнескінченний співвісний хвилевід; перпендикулярно схрещений нескінченний прямокутний хвилевід. Визначено, що для заданої довжини хвилі підбором електричних параметрів хвилевідних пристроїв можна забезпечити необхідний рівень передачі потужності з основного хвильоводу в бічний (в інтервалі $0 \leq |S_e|^2 \leq 0,84$). Уперше сформульовано загальну резонансну умову для хвилевідних зчленувань з діелектричною вставкою в області щілини зв'язку та встановлено точність визначення резонансної довжини хвилі з цієї умови;

- уперше розв'язано задачі збудження та випромінювання електромагнітних хвиль вузькою резонансною щілиною, прорізаною в ідеально провідній сфері довільного радіуса, збуджуваною напівнескінченим прямокутним хвильоводом з імпедансним торцем; прямокутним хвильоводом з одно- і двохщілинним прохідним резонатором. Виявлено, що зміна значень матеріальних параметрів магнітодіелектрика, з якого виконано імпедансне покриття торця хвильоводу, а отже, і значень його поверхневого імпедансу дозволяє перебудову довжини хвилі резонансного випромінювання випромінювача при збереженні його вхідного узгодження в межах (30-36) %, що відповідає половині діапазону одномодового режиму хвильоводу. Визначено, що розміщення у хвилевідному тракті прохідного резонатора суттєво підвищує добротність системи, при цьому резонансна крива має велику крутість, а її форма наближається до прямокутної, наявність у діафрагмі другої щілини приводить до звуження смуги пропускання за рівнем половинної потужності випромінювання до 50 %;

- уперше розв'язано задачу формування електромагнітних полів структурою, що складається з резонансної щілини в ідеально провідній сфері довільного радіуса та двох радіальних імпедансних вібраторів. Визначено умови реалізації випромінювача типу Клевіна на сфері;

- уперше узагальненим методом наведених ЕМРС визначено розподіли струмів у багатоелементній комбінованій щілинно-вібраторній решітці з імпедансними випромінювачами, що поєднує щілину, прорізану у стінці прямокутного хвильоводу та систему пасивних імпедансних вібраторів, розміщених над щілиною у вільному півпросторі. Виявлено, що така система дозволяє отримати діаграму спрямованості (ДС), подібну до ДС директорної антени (решітки Ягі-Уда) при забезпеченні доброго узгодження з хвилевідним трактом;

- уперше реалізовано багаточастотний випромінювач на основі електрично довгої щілини у вузькій стінці скінченної товщини багатомодового прямокутного хвилеводу при збудженні хвилеводу вищими типами хвиль на різних частотах;
- запропоновано новий метод імпедансного синтезу ДС випромінювання антенних решіток з імпедансними вібраторними та щілинними елементами. Вперше отримано аналітичні формули для дійсної і уявної частин поверхневих імпедансів елементів решіток, які забезпечують формування максимуму ДС випромінювання решіток в заданному напрямку.

Практичне/теоретичне значення одержаних результатів. Результати роботи значно підвищують розуміння процесів формування електромагнітних полів вібраторними, щілинними й комбінованими вібраторно-щілинними структурами в різноманітних електродинамічних об'ємах, у тому числі з імпедансними границями. Розв'язання складних задач розсіяння та випромінювання електромагнітних хвиль у строгій самоузгодженій постановці, що забезпечує достовірність одержаних результатів, розкриває потенційні можливості розробки пропозицій щодо цілеспрямованого вибору електродинамічних принципів і способів технічної реалізації випромінюючих структур із заданими просторово-енергетичними та частотними характеристиками.

Побудовані в роботі математичні моделі та розвинені електродинамічні методи розрахунку характеристик різноманітних комбінованих вібраторно-щілинних випромінюючих структур і їх багатоелементних систем, які дозволяють провести багатопараметричний аналіз фізичних властивостей електромагнітних полів у таких системах і дати чітку фізичну інтерпретацію теоретичних і експериментальних даних, отриманих при їх дослідженні, є подальшим розвитком важливого наукового напрямку прикладної електродинаміки, орієнтованого на розробку високоточних швидкодіючих алгоритмів проектування сучасних антенних систем і пристроїв різного призначення мікрохвильового діапазону. Ці результати, а також виявлені нові фізичні закономірності й особливості у формуванні просторово-частотних і енергетичних характеристик електромагнітних полів, збуджуваних комбінованими вібраторно-щілинними структурами з імпедансними вібраторними та щілинними випромінювачами у різних електродинамічних об'ємах, зокрема з імпедансними границями, складають основу для розробки та створення нової елементної бази радіоелектронних засобів метрового та мікрохвильового діапазонів, яка дозволяє значно розширити їхні функціональні можливості. Вони перспективні для застосування при вирішенні проблеми забезпечення електромагнітної сумісності РЕЗ, завадозахищеності, селекції сигналів, мініатюризації РЕЗ, створення випромінювачів зі спеціальними вимогами до характеристик спрямованості й випромінювання, при розробці апаратури спеціального призначення.

Значна частина отриманих у роботі результатів використана в практичних розробках, які є складовою частиною науково-дослідних робіт, і впроваджена при їх виконанні. Отримані результати увійшли також до циклу наукових праць «Створення випромінюючих структур багатфункціональних радіоелектронних систем», відзначеного Державною премією України в галузі науки і техніки у 2016 році.

Публікації. Основні наукові результати дисертації опубліковано у

5 монографіях (3 з яких – англomовні, у видавництві “Springer”), 2 розділах монографій та 23 статтях: 6 публікацій – у фахових виданнях України, 17 публікацій – у зарубіжних спеціалізованих виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз, а також у 31 публікації (30 з яких входять до наукометричної бази “Scopus”) та у матеріалах 21 міжнародної наукової конференції. Наукові результати додатково відображені в 2 статтях та 2 патентах України.

Особистий внесок здобувача. У дисертації узагальнено матеріали самостійних досліджень автора [8, 9], а також результати, які отримані й опубліковані ним у співавторстві. Особистий внесок здобувача при проведенні спільних робіт полягає в постановці задач, виборі методу їхнього розв'язання, участі в одержанні розв'язків і виконанні розрахунків, проведенні експериментальних досліджень, в аналізі числових і експериментальних результатів, виявленні, інтерпретації й узагальненні фізичних закономірностей. Розрахункові формули, наведені в роботі, та наукові висновки належать авторові особисто.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи оприлюднено в 31 доповіді на 21 міжнародній науковій конференції та семінарі: 6-th International Conference Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (Sevastopol, Ukraine, 2012); 21, 22, 23, 24 Международные Крымские конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (Севастополь, Украина, 2011, 2012, 2013, 2014); XVII-th, XVIII-th, XX-th, XXIth, XXIIth, XXIVth International Seminars/Workshops on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (Tbilisi, Georgia, 2012, 2016; Lviv, Ukraine, 2013, 2015, 2019; Dnipro, Ukraine, 2017; Tbilisi, Georgia, 2020); IX, X, XI International Conferences on Antenna Theory and Techniques, (Odessa, Ukraine, 2013; Kharkiv, Ukraine, 2015; Kyiv, Ukraine, 2017); 9-th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (Kharkiv, Ukraine, 2016.); 16-th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Lviv, Ukraine, 2016); 8-th, 9-th International Conferences Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (Odessa, Ukraine, 2016, 2018); IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (Kyiv, Ukraine, 2017); 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (Kharkiv, Ukraine, 2020).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 409 сторінок, із них 310 сторінок основного тексту. Робота ілюстрована 9 таблицями та 112 рисунками. Список використаних джерел містить 280 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить загальну характеристику проблеми, її актуальність і обґрунтування необхідності проведення досліджень за темою дисертації. У ньому сформульовано мету і задачі дисертаційної роботи, новизну і практичну значимість отриманих результатів. Викладено зв'язок роботи з науковими темами, наведено відомості про публікації автора й апробації результатів дослідження.

У першому розділі «Загальні питання теорії формування електромагнітних полів системами тонких імпедансних вібраторів і вузьких щілин в

електродинамічних об'ємах з ідеально провідними й імпедансними границями» сформульовано в найбільш загальному вигляді задачу про збудження (розсіювання, випромінювання) електромагнітних полів матеріальними тілами скінченних розмірів у присутності отворів зв'язку двох електродинамічних об'ємів. Виходячи з імпедансної граничної умови Леонтовича на поверхнях тіл і умови безперервності тангенціальних складових магнітних полів на отворах зв'язку, отримано систему інтегральних рівнянь відносно густин поверхневих електричних (на тілах) і еквівалентних магнітних (на отворах зв'язку) струмів.

Обґрунтовано та здійснено фізично коректний перехід від отриманих інтегральних рівнянь до одновимірних рівнянь для струмів у тонких лінійних імпедансних вібраторах (у загальному випадку з нерегулярними вздовж вібраторів геометричними й електрофізичними параметрами) і вузьких щілинах (координатних і некоординатних щодо границь розглянутих просторових областей) у комбінованих вібраторно-щілинних структурах.

Здійснено огляд існуючих методів розв'язання отриманих інтегральних рівнянь для струмів у вібраторно-щілинних структурах. Подано особливості застосування методу моментів, проаналізовано переваги й недоліки різних наближених аналітичних методів для розв'язання отриманих інтегральних рівнянь, а також проаналізовано особливості застосування узагальненого методу наведених ЕМРС для дослідження багатоеlementних вібраторно-щілинних структур.

Запропоновано нові аспекти в розвитку теорії електрично тонких випромінювачів: введено до електродинамічного аналізу електрично тонких випромінювачів нові поняття ефективних наведених імпедансів електричного і магнітного типів. Обґрунтування такого запровадження базується на необхідності формулювання струмових інтегральних рівнянь для випромінювачів електричного і магнітного типів у дуально-симетричній формі. Слід зазначити, що вирази інтегральних струмових рівнянь у такій формі в класичній теорії випромінювання електромагнітних полів відсутні. Запропонований підхід дозволив усунути вплив двох існуючих методологічних чинників: несиметричність у традиційному формулюванні імпедансних граничних умов щодо дуальних базисних перестановок, а також необхідність використання в постановках крайових задач для вібраторних і щілинних випромінювачів різнотипних електродинамічних областей. У результаті отримано єдину форму інтегральних рівнянь для струмів в електрично тонких випромінювачах:

$$\frac{1}{ik \begin{pmatrix} \epsilon_2 \\ \mu_2 \end{pmatrix}} \left[\vec{n}, (\text{grad div} + k^2 \epsilon_2 \mu_2) \int_V \begin{pmatrix} \vec{j}^e(\vec{r}') \\ -\vec{j}^m(\vec{r}') \end{pmatrix} \hat{G}(\vec{r}, \vec{r}') dV \right] + \begin{pmatrix} Z^e \\ Z^m \end{pmatrix} \left[\vec{n}, \begin{pmatrix} \vec{j}_s^e \\ -\vec{j}_s^m \end{pmatrix} \right]_S = \left[\vec{n}, \begin{pmatrix} \vec{E}_0 \\ \vec{H}_0 \end{pmatrix} \right], \quad (1)$$

де $Z^e = (z_{ext}^e + \tilde{z}_i^e)$ – загальний ефективний імпеданс електричного типу, що розподілений на поверхні вібратора, $Z^m = (z_{ext}^m + \tilde{z}_i^m)$ – загальний ефективний імпеданс магнітного типу, що розподілений на апертурі щілини, z_{ext}^e , z_{ext}^m – ефективні наведені імпеданси електричного і магнітного типів.

У другому розділі «Збудження та випромінювання електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними структурами в прямокутному хвилеводі» вперше отримано розв'язки відповідних граничних задач електродинаміки, побудовано математичні моделі та виявлено основні особливості процесів збудження та формування електромагнітних полів випромінюючими структурами, складовими елементом яких є щілинні випромінювачі в широкій стінці прямокутного хвилеводу та імпедансні вібратори (монополі), розташовані всередині та зовні хвилеводу, які дозволяють керувати просторово-енергетичними та частотними характеристиками випромінюючих структур (Рис. 1).

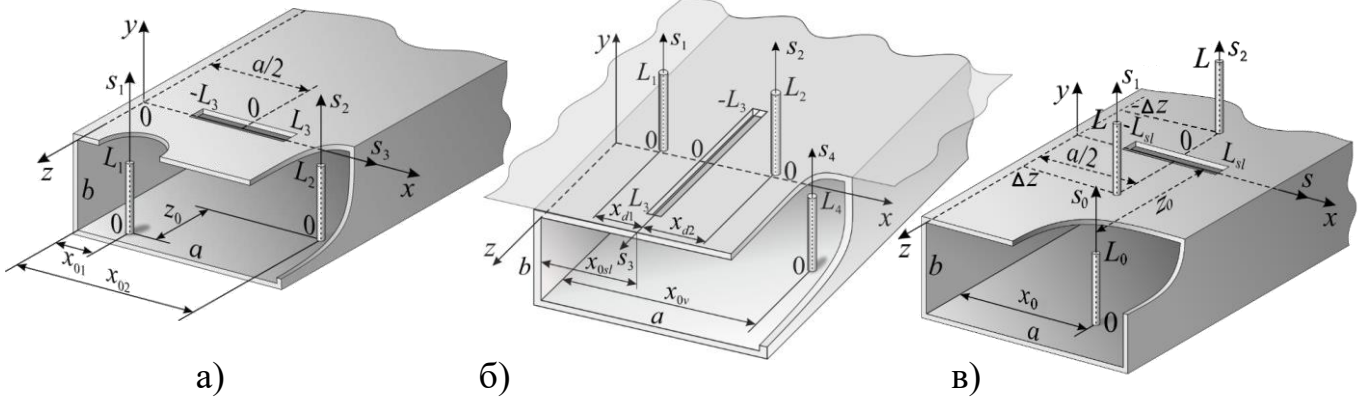


Рис.1. Варіанти комбінованих вібраторно-щілинних структур на прямокутному хвилеводі

Розв'язки задач отримано за умови збудження прямокутного хвилеводу основним типом хвилі. Паралельно вузьким стінкам у хвилеводі розташовано один або два несиметричних тонких вібратори з радіусом r і довжиною $2L_v$ ($[r/(2L_v)] \ll 1$, $(r/\lambda) \ll 1$, $v=1,2$) зі змінним уздовж вібраторів поверхневим імпедансом $z_i(s_v)$. У широкій стінці хвилеводу товщиною h ($[h/\lambda] \ll 1$) прорізана поперечна або поздовжня щілина шириною d і довжиною $2L_{sl}$ ($[d/\lambda] \ll 1$, $[d/(2L_{sl})] \ll 1$), що випромінює у вільний півпростір над ідеально провідною площиною, де по обидва боки від щілини також може бути розташовано два тонких імпедансних монополі (Рис. 1б, в). При розв'язанні системи інтегральних рівнянь узагальненим методом наведених ЕМРС для апроксимації електричних струмів у вібраторах $J_v(s_v)$ і еквівалентного магнітного струму на апертурі щілини $J_{sl}(s_3)$ використано функціональні розподіли струмів, які отримано при розв'язанні асимптотичним методом усереднення ключових задач розсіювання хвиль імпедансним вібратором і щілиною: $J_v(s_v) = J_{0v}f_v(s_v)$ і $J_{sl}(s_3) = J_{0sl}f_{sl}(s_3)$ – для поперечної щілини, прорізаної симетрично осі хвилеводу, $J_{sl}(s_3) = J_{0sl}^s f_{sl}^s(s_3) + J_{0sl}^a f_{sl}^a(s_3)$ – для поздовжньої щілини, де J_{0v} , J_{0sl} , J_{0sl}^s , J_{0sl}^a – невідомі амплітуди, а $f_v(s_v) = \cos \tilde{k}s_v - \cos \tilde{k}L_v$, $f_{sl}(s_3) = f_{sl}(s_3) = \cos ks_3 - \cos kL_{sl}$, $f_{sl}^s(s_3) = \cos ks_3 \cos k_g L_3 - \cos kL_3 \cos k_g s_3$, $f_{sl}^a(s_3) = \sin ks_3 \sin k_g L_3 - \sin kL_3 \sin k_g s_3$ – функціональні розподіли, які отримано методом усереднення. Тут s_v і s_3 локальні координати, пов'язані з осями вібраторів і щілин відповідно; $\tilde{k} = k - \frac{i2\pi z_i^{av}}{Z_0 \Omega}$, $k = 2\pi/\lambda$,

$k_g = 2\pi / \lambda_g$, λ , λ_g – довжини хвиль у вільному просторі та хвилеводі,

$z_i^{av} = \frac{1}{2L_v} \int_{-L_v}^{L_v} z_i(s_v) ds_v$ – середнє значення внутрішнього імпедансу вздовж вібратора,

$\Omega = 2\ln(2L_v / r)$. В результаті аналітичного розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь одержимо амплітуди струмів J_{0v} і J_{0sl} (або J_{0sl}^s і J_{0sl}^a), які дозволяють далі визначити енергетичні характеристики структур.

У діапазоні довжин хвиль одномодового режиму прямокутного хвилеводу досліджено енергетичні характеристики вібраторно-щілинних структур. Виявлено основні особливості процесів випромінювання й розсіювання електромагнітного поля такими структурами при зміні їх геометричної побудови й електрофізичних параметрів елементів. Розглянуто різні види розподілу уявної частини імпедансу уздовж вібратора: $\phi_0(s_v) = 1$ – сталий розподіл, $\phi_1(s_v) = 2[1 - (s_v / L_v)]$ – розподіл, що лінійно спадає до кінця вібратора і $\phi_2(s_v) = 2(s_v / L_v)$ – лінійно зростає, а також різні варіанти структур як при взаємодії між вібраторами й щілиною, так і без неї у випадку їх поляризаційної розв'язки. Так, для двоелементної структури з поперечної щілини в широкій стінці прямокутного хвилеводу, усередині якого розташовано вібратор на відстані $z_0 = 0$ зі змінним поверхневим імпедансом виявлено, що такий вібратор практично не впливає на коефіцієнт випромінювання $|S_\Sigma|^2(\lambda)$ щілини, у той же час дозволяє суттєво варіювати залежності коефіцієнта відбиття $|S_{11}|(\lambda)$ і проходження $|S_{12}|(\lambda)$ структури у порівнянні з аналогічними для поодинокій щілини. Виявлено, що в певних інтервалах довжин хвиль енергетичні параметри структури залишаються такими ж, як і для поодинокій щілини, що може бути використано в технологічних цілях, наприклад, монополі може бути виготовлений у вигляді порожньої стійки, усередині якої прокладені дроти електричного живлення для вбудованих у щілину діодів, при реалізації пристроїв із комутацією режимів роботи щілинного випромінювача. У випадку наявності взаємодії між щілиною і вібратором ($z_0 \neq 0$) виявлено, що й ідеально провідний і імпедансний монополі істотно можуть впливати на зміну її коефіцієнта випромінювання. Причому у випадку імпедансного вібратора цей вплив виявляється більш значним. Установлено, що в такій структурі для реалізації максимального коефіцієнта випромінювання, близького до одиниці, який згідно з теорією хвилевідно-щілинних випромінювачів принципово недосяжний у порожнистому нескінченному хвилеводі, необхідно використовувати монополі зі змінними уздовж них індуктивними імпедансами. При цьому власні резонансні довжини хвиль щілини й монополів виявляються трохи рознесеними по діапазону, а загальний резонанс вібраторно-щілинної структури зміщується до значення резонансної довжини хвилі для вібратора. Зсуви імпедансного вібратора від центру щілини на відстань z_0 уздовж поздовжньої осі хвилеводу, при яких спостерігається максимальний взаємний вплив елементів вібраторно-щілинної структури, є кратними $\lambda_g / 4$ – чверті резонансної для щілини довжини хвилі у хвилеводі, при цьому максимальні значення коефіцієнта випромінювання структури, близькі до одиниці, мають місце при зсувах

z_0 , кратних величині $\lambda_G/2$. Зміщення вібратора у площині поперечного перерізу хвилеводу при $z_0 = \lambda_G/2$ зумовлює зміну ширини смуги частотної залежності коефіцієнта випромінювання структури яка змінюється майже втричі (при $x_{01} = a/2$ у порівнянні з її величиною для $x_{01} = a/8$) при незначній (біля 5 %) зміні максимального значення коефіцієнта випромінювання.

При розміщенні в хвилеводі під щілиною двох монополів фіксованої довжини, але з різними значеннями поверхневого імпедансу або з різними розподілами імпедансу вздовж них, існують можливості як оптимізувати вхідне узгодження хвилевідно-щілинного випромінювача на заданій довжині хвилі, так і отримати високودобротні резонанси відбиття від структури на заданій довжині хвилі при асиметричному розташуванні вібраторів, наприклад, при необхідності забезпечення додаткових умов електромагнітної сумісності. Виявлено, що для двохелементних і трьохелементних структур, у яких відсутня взаємодія між щілиною й вібраторами, існують інтервали довжин хвиль, у яких вони виявляються більш узгодженими зі збуджуючим хвилеводом у порівнянні з одиночною щілиною. Наприклад, при рівнях коефіцієнта випромінювання щілини $0,075 \leq |S_\Sigma|^2 \leq 0,15$ (прийнятних для випромінювачів багатоеlementних решіток) виявляється можливим зменшити модуль коефіцієнта відбиття за рахунок впливу вібраторів у два-три рази. Показано ефективність застосування імпедансних монополів з імпедансом індуктивного типу для вібраторно-щілинної структури в низкопрофільних прямокутних хвилеводах, у яких розміщення ідеально провідних вібраторів необхідних резонансних розмірів принципово неможливе.

Для трьохелементної структури прийнятний коефіцієнт відбиття не може бути досягнуто при високому коефіцієнті випромінювання у випадку, коли вібратори мають однакові значення розподілених поверхневих імпедансів $\bar{Z}_{s1} = \bar{Z}_{s2}$. Максимальне значення коефіцієнта випромінювання при задовільному узгодженні у хвилевідному тракті досягається при $z_0 = \lambda_G/2$ і за наявності в одного з вібраторів змінного вздовж нього поверхневого імпедансу (Рис. 2, 3).

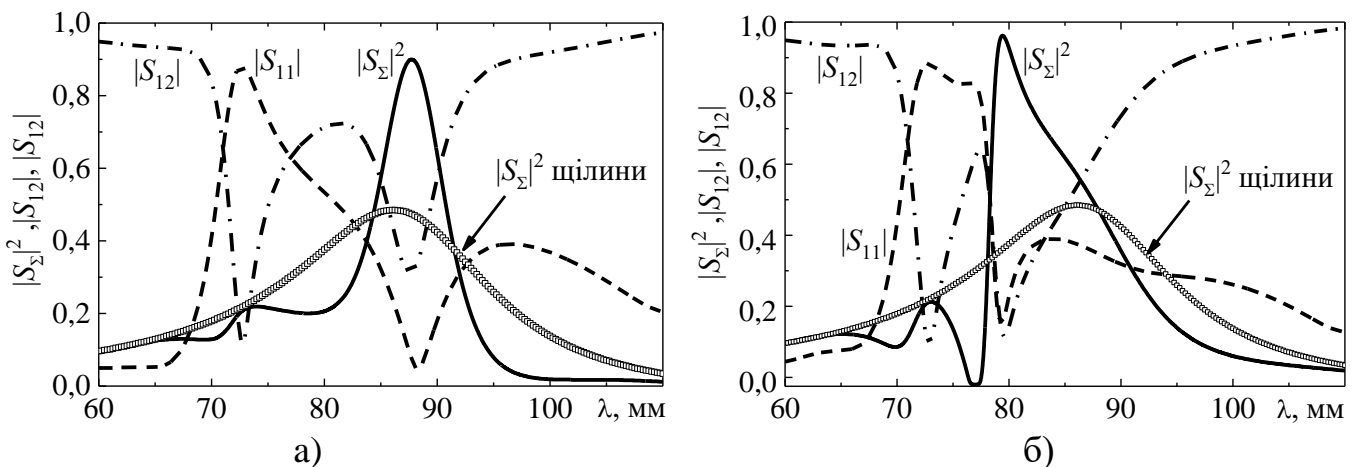


Рис. 2. Електродинамічні характеристики системи щілина–вібратори залежно від довжини хвилі при $z_0 = \lambda_G/2 = 64.0$ мм, $\bar{Z}_{s1} \neq \bar{Z}_{s2}$ ($\bar{Z}_{s2} = 0$),

$$r_{i1}(s_1) = r_1 \exp[-\ln(4.0)\phi_{1(2)}(s_1)]: \text{ а) } \bar{Z}_{s1}(s_1) = ikr_1 \ln(4.0)\phi_1(s_1); \text{ б) } \bar{Z}_{s1}(s_1) = ikr_1 \ln(4.0)\phi_2(s_1)$$

Достовірність результатів числового моделювання засвідчено експериментальними дослідженнями. На Рис. 3 наведено розрахункові й експериментальні залежності коефіцієнта випромінювання $|S_\Sigma|^2$ трьохелементної вібраторно-щілинної структури (Рис. 1а) від λ при $z_0 = \lambda_G/2$. На Рис. 3 присутні також фото експериментальних макетів монополів. Задовільне узгодження розрахункових і експериментальних даних підтверджує фізичну адекватність побудованої математичної моделі та коректність проведення розрахунків.

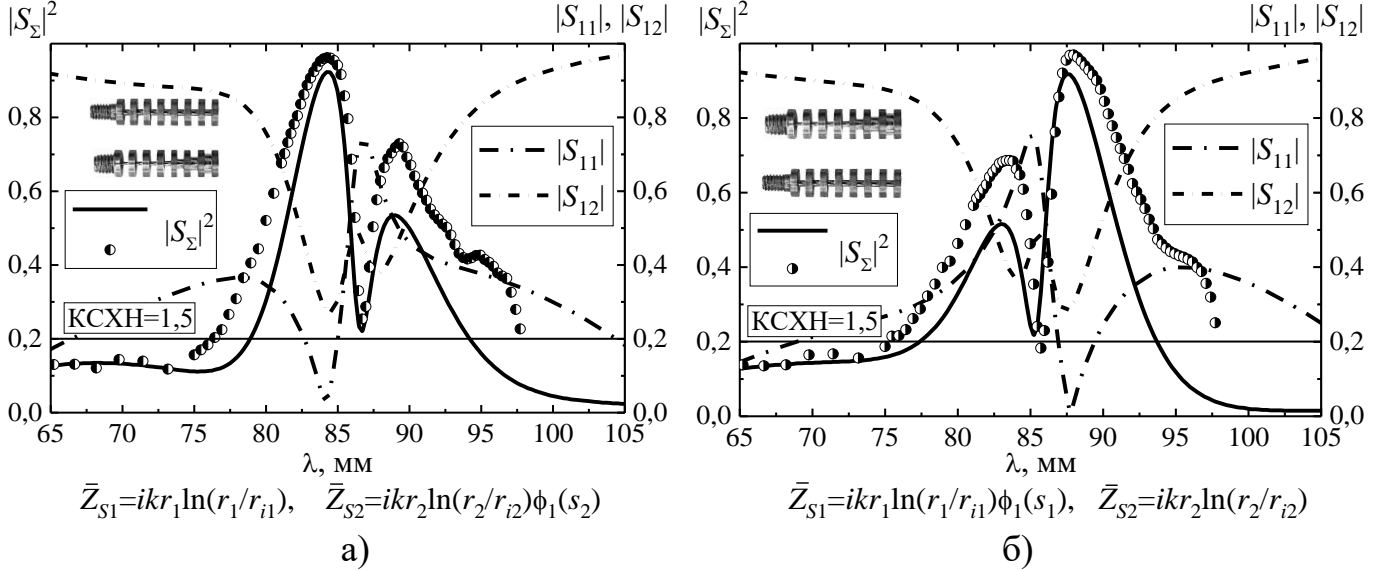


Рис. 3. Електродинамічні характеристики системи щілина–вібратори залежно від довжини хвилі при $z_0 = \lambda_G / 2 = 64.0$ мм, $\bar{Z}_{S1} \neq \bar{Z}_{S2}$,
 $r_{i1(2)}(s_{1(2)}) = r_{1(2)} \exp[-\ln(4.0)\phi_1(s_{1(2)})]$ (кружки – експериментальні дані)

Узагальненим методом наведених ЕМРС розв'язано задачу визначення струмів в елементах хвилевідних комбінованих вібраторно-щілинних структур, які дозволяють сформувати поля випромінювання, як у випадку випромінювача Клевина. Але на відміну від відомих в літературі робіт вперше досліджено структури з вібраторними елементами у вигляді імпедансних монополів, два з яких розташовані поза хвилеводом, а один усередині хвилевідного тракту (Рис. 1б, в).

Визначено оптимальні параметри випромінювача Клевина (L_v , x_d , \bar{Z}_s) при випромінюванні у півпростір над нескінченною площиною для одержання ДС із однаковою шириною в E - і H -площинах, ДС із найбільш низьким рівнем бічного випромінювання, для забезпечення максимально близьких за шириною ДС в E - і H -площинах при заданому рівні бічного випромінювання (Рис. 4). Узагальнюючи отримані результати моделювання, можна відзначити, що оптимальна ДС випромінювача Клевина з напівхвильовою щілиною може бути реалізована тільки при досить малому коефіцієнті випромінювання $|S_\Sigma|^2 < 0.1$, оскільки компенсація в дальній зоні поля випромінювання щілини (уздовж площини) дифракційними полями вібраторів одночасно супроводжується придушенням власного поля в щілині. З іншого боку, зменшення впливу вібраторів (за рахунок зміни їх геометричних або електрофізичних параметрів) на щілину, що підвищує її випромінюючу здатність, порушує умови одержання оптимальної форми ДС.

Установлено, що підвищити коефіцієнт випромінювання структури з поздовжньою щілиною до $|S_{\Sigma}|^2 \approx 0,49$ при збереженні подібних ДС в E - і H -площинах дозволяє збільшення довжини щілини на (15-20)% у порівнянні з її резонансною довжиною при відповідній зміні довжин вібраторів.

При цьому збільшення коефіцієнта випромінювання буде приводити й до зростання величини коефіцієнта відбиття. Подолати це протиріччя й одержати випромінюючу структуру з оптимальною ДС, з високим коефіцієнтом випромінювання й малим коефіцієнтом відбиття дозволяє розташування усередині хвилеводу додаткового вібраторного настроювального елемента. У цьому випадку коефіцієнт випромінювання структури з поздовжньою напівхвильовою щілиною збільшується до $|S_{\Sigma}|^2 \approx 0,4$ при збереженні характеристик спрямованості випромінювача.

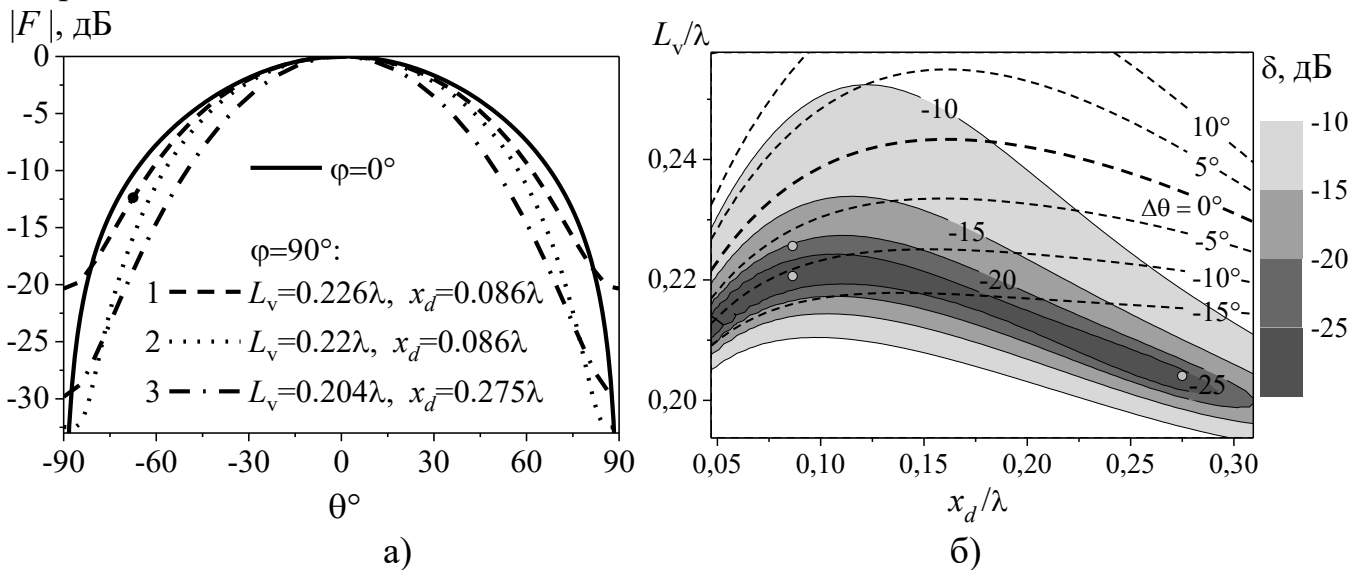


Рис. 4. ДС випромінювача Клевіна з імпедансними монополями (а) і залежності відносного рівня бічного випромінювання δ й різниці в ширині ДС в ортогональних площинах від електричної довжини монополів і їх віддалення від щілини (б) при $\bar{Z}_s = 0,1i$

Для структури з поперечною щілиною (Рис. 1 в) отримано рівняння параметричного типу щодо реактивного імпедансу монополя, при якому забезпечується резонансний режим випромінювання структури. Побудовано наближений аналітичний розв'язок такого рівняння в окремому випадку розташування четвертьхвильового монополя й щілини.

У третьому розділі «Формування електромагнітних полів у хвилевідних зчленуваннях з вібраторно-щілинними структурами в області зв'язку, діелектричними вставками й імпедансними поверхнями» розв'язано граничні задачі електродинаміки, побудовано математичні моделі та досліджено електродинамічні характеристики структур, що являють собою E -площинні Т-подібні зчленування нескінченного й напівнескінченного хвилеводів (рівнорозмірних і різнорозмірних поперечних перерізів) через поперечну щілину в широкій стінці нескінченного хвилеводу, усередині якого розміщено імпедансний монополі (пара монополів). (Рис. 5). При цьому поверхня торця напівнескінченного хвилеводу може бути також

імпедансною (включаючи покриття з метаматеріалу), що, як виявлено, приводить до суттєво нових електродинамічних характеристик (у тому числі багаторезонансних режимів роботи) розглянутих структур.

Виявлено, що розташування монополя, який має таку ж резонансну частоту, як і щілина, в області зв'язку при $z_0 = 0$ мм приводить до зменшення коефіцієнта проходження P_{12} й збільшення коефіцієнта відбиття P_{11} в основному хвилеводі при незмінному значенні коефіцієнта передачі за потужністю в бічний хвилевід P_{13} . При зміні величини зсуву z_0 поздовжньої осі вібратора щодо поздовжньої осі щілини в частках, кратних $\lambda_G^{Sres} / 8$, де λ_G^{Sres} – резонансна довжина хвилі щілини у хвилеводі, спостерігається істотне зростання потужності хвилі, що пройшла в плече 3 (до 90 % при $z_0 = \lambda_G^{Sres} / 2$). Зсув монополя в площині поперечного перерізу хвилеводу приводить до розширення ширини смуги передатної характеристики $P_{13}(\lambda)$ майже на 70 %. При використанні монополів однакової довжини, але з різними значеннями та законами розподілу поверхневого імпедансу з'являється можливість поділу потужностей хвиль, що пройшли, у заданому співвідношенні на певній довжині хвилі всього робочого діапазону хвилеводу при задовільному ($K_{СХН} \leq 2,0$) узгодженні в плечі 1.

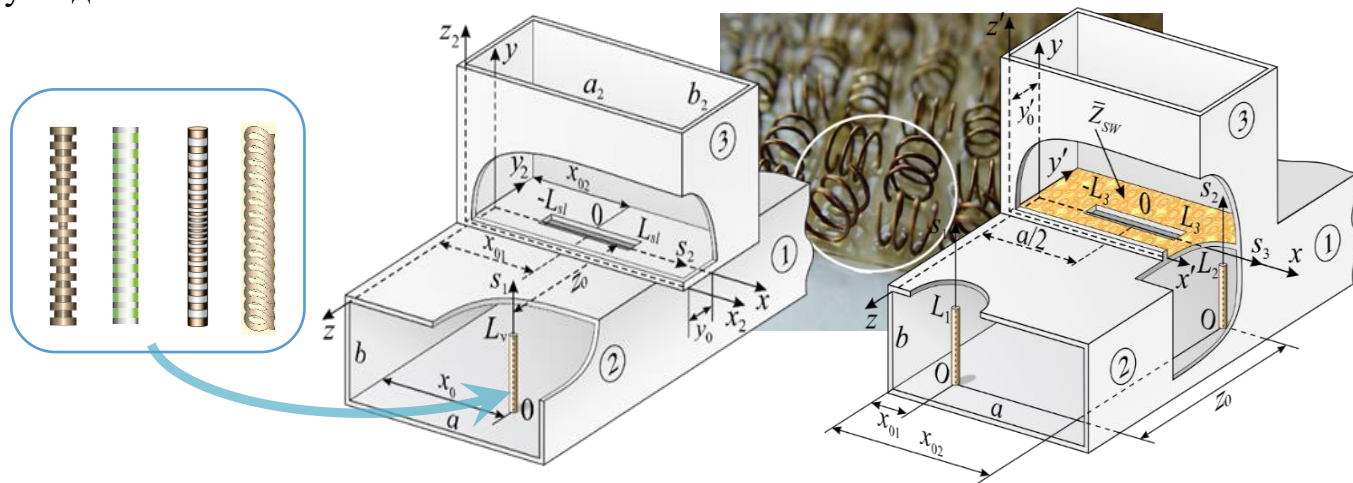


Рис.5. Хвилевідні зчленування з вібраторно-щілинними структурами в області зв'язку й імпедансними поверхнями

Можливості, що з'явилися для передачі більшої частини падаючої потужності з основного хвильоводу в бічний дозволили реалізувати в зовнішньому хвильоводі додаткові канали поділу потужності - режими рівного поділу падаючої потужності як окремо між модами в бічному хвильоводі (за умови його багатомодового функціонування), так і між усіма фізичними каналами поділу потужності. Так, при збільшенні розміру широкої стінки бічного хвильоводу в 2 рази при $x_{01} = a/2$, $x_{02} = a_2/4$ у ньому будуть ефективно збуджуватися два типи хвиль: H_{10} і H_{20} . Визначено, що варіюванням значень довжини щілини й поверхневого імпедансу монополя може бути забезпечений приблизно рівний поділ потужності $P_{13}^{10} \approx P_{13}^{20}$ між хвилями H_{10} й H_{20} , що пройшли в бічний хвильовід, наприклад, в інтервалах довжин хвиль $\lambda \in [85,0; 92,5]$ мм (Рис. 6а) і $\lambda \in [93,0; 98,5]$ мм (Рис. 6б) при $K_{CXH} \leq 2,0$. На

довжинах хвиль 87,5 мм і 95,0 мм при доброму узгодженні в бічне плече передається 90 % падаючої потужності за умови її приблизно рівного поділу між збуджуваними модами ($P_{13}^{10} = P_{13}^{20} \approx 0.45$). На довжинах хвиль 85,0 мм і 90,0 мм (Рис. 6а), а також 92,5 мм і 97,5 мм (Рис. 6б) реалізується режим рівного поділу між усіма фізичними каналами поділу потужності ($P_{12} = P_{13}^{10} = P_{13}^{20} \approx 0.3$). Подібні результати (рівність поділу потужності між модами в бічному хвилеводі так між усіма фізичними каналами поділу потужності) мають місце і у випадку, коли в бічному хвилеводі поряд із хвилями типу H_{10} і H_{20} буде ефективно збуджуватися й хвиля типу H_{30} , що забезпечується при певному зміщенні щілини щодо вузьких стінок хвилевідних секцій.

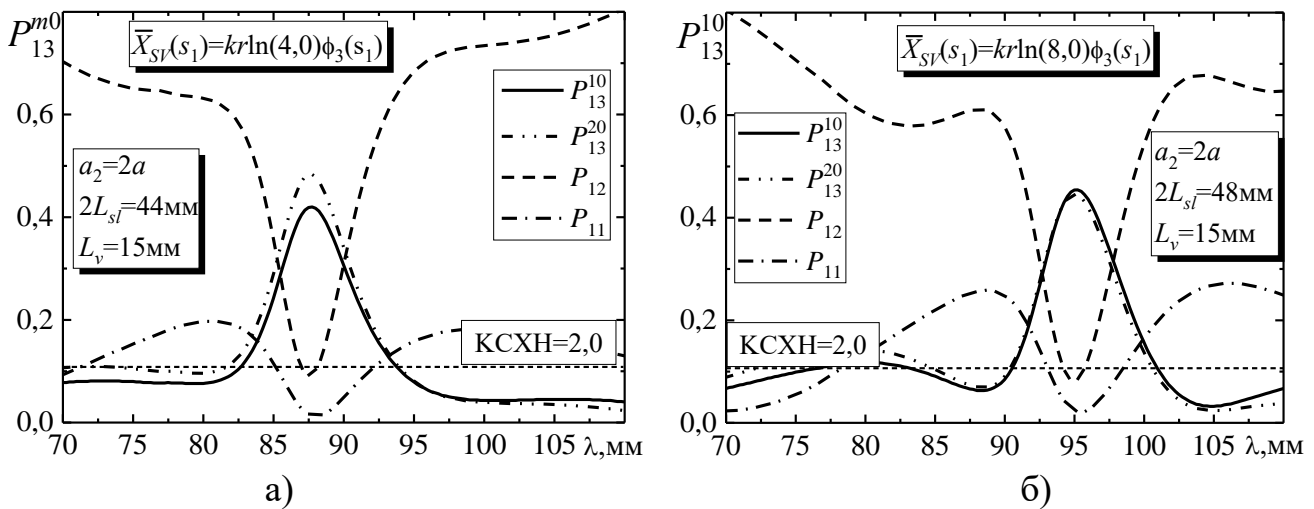


Рис. 6. Залежності енергетичних характеристик від довжини хвилі для вібраторно-щілинної структури ($a = 58$ мм, $b = 25$ мм) при $b_2 = b$, $x_{01} = a/2$, $x_{02} = a_2/4$:

а) $z_0 = 68,0$ мм; б) $z_0 = 85,0$ мм

Розміщення в основному хвилеводі двох вібраторів, настроєних на рознесені резонансні частоти, дозволяє реалізувати дворезонансний режим поділу потужності між плечима зчленування. При спеціальному виборі геометричних і електрофізичних параметрів вібраторів, що забезпечують зближення їх резонансних частот, можливе розширення робочої смуги хвилевідного пристрою.

Якщо на торець хвилевідної секції 3 нанести шар магнітодіелектрика, то резонансна довжина хвилі щілини зміниться залежно від товщини покриття. Тоді, підбираючи відповідним чином величину й закон зміни поверхневого імпедансу монополів, а також відстань z_0 для одержуваних значень $\lambda_G^{Sres}/2$, маємо можливість варіювання енергетичними характеристиками хвилевідного зчленування в широкому діапазоні довжин хвиль при незмінних геометричних розмірах вібраторів і щілини.

Проведено порівняльний аналіз характеристик зчленування для трьох випадків імпедансного покриття торця бічного хвилевідного плеча: із природнього фериту без втрат, із природнього магнітодіелектрика TDK-IR-A095 і штучного метаматеріалу LR-5I, для яких у розглянутому діапазоні частот відомі з літератури

значення матеріальних параметрів, на основі чого було розраховано величини поверхневих імпедансів покриттів. Покриваючий шар фериту й магнітодіелектрика TDK-IR-A095 характеризується імпедансом індуктивного типу, а для шару метаматеріалу LR-5I існує область частот, у якій уявна частина поверхневого імпедансу приймає негативні значення, а в іншій частині діапазону дифракційні властивості шару метаматеріалу стають близькі до металізованого екрана, який характеризується імпедансом індуктивного типу. Показано, що таке покриття із частотно залежним різнотипним імпедансом може забезпечувати трьохрезонансний режим передачі потужності з основного хвильоводу в бічний (Рис. 7).

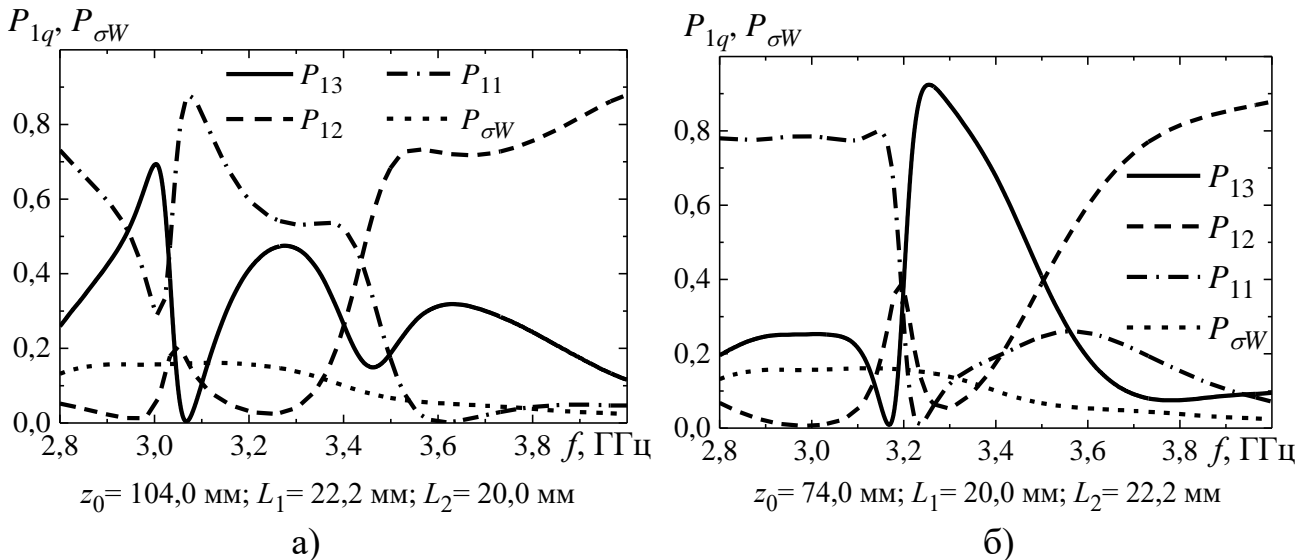


Рис. 7. Енергетичні характеристики зчленування із трьохелементною вібраторно-щілинною структурою ($2L_3 = 40 \text{ мм}$) й покриттям із метаматеріалу LR-5I

Виявлені фізичні особливості були підтверджені експериментальними дослідженнями, результати яких наведено на Рис.8.

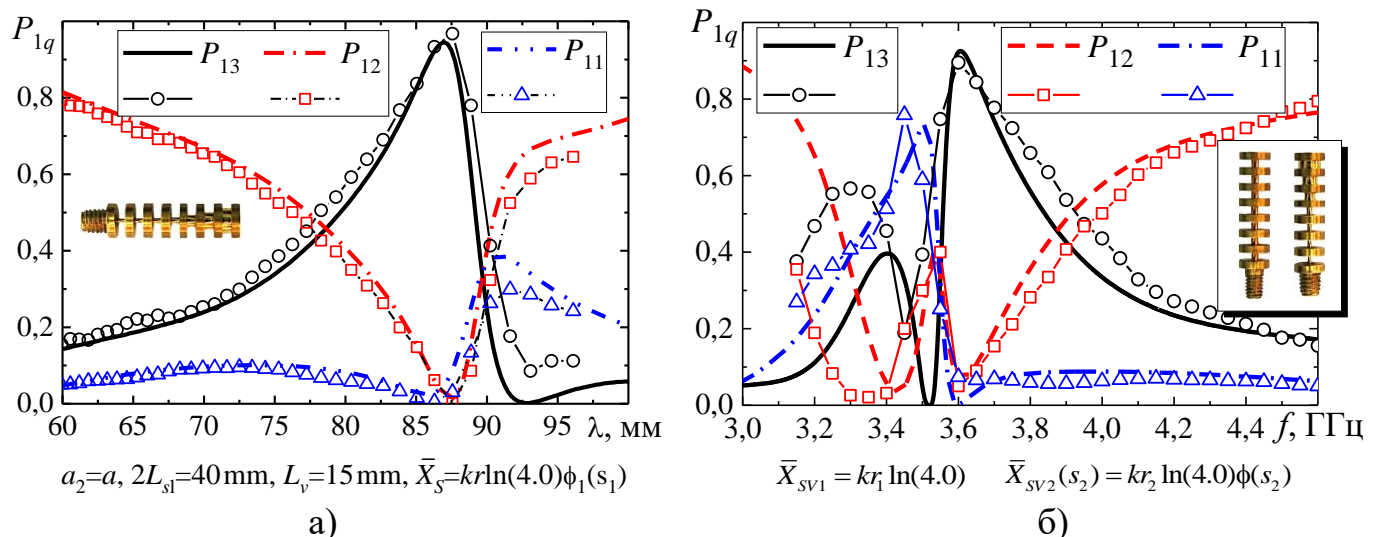


Рис. 8. Розрахункові (лінії) і експериментальні (значки) результати для двоелементної (а) і трьохелементної (б) структур

Розв'язано граничні задачі електродинаміки та побудовано математичні моделі для дослідження електродинамічних характеристик хвильовідних зчленувань

з діелектричними вставками в області щілини зв'язку (Рис. 9). При цьому в якості бічних плечей пристроїв розглянуто: Т-орієнтований напівнескінченний хвилевід з імпедансним торцем; напівнескінченний співвісний хвилевід; перпендикулярно схрещений нескінченний прямокутний хвилевід. Визначено можливості керування електродинамічними характеристиками хвилевідних зчленувань за допомогою параметрів діелектричної вставки, довжини щілини та імпедансного покриття торця бічного хвилеводу в діапазоні одномодового режиму роботи основного прямокутного хвилеводу.

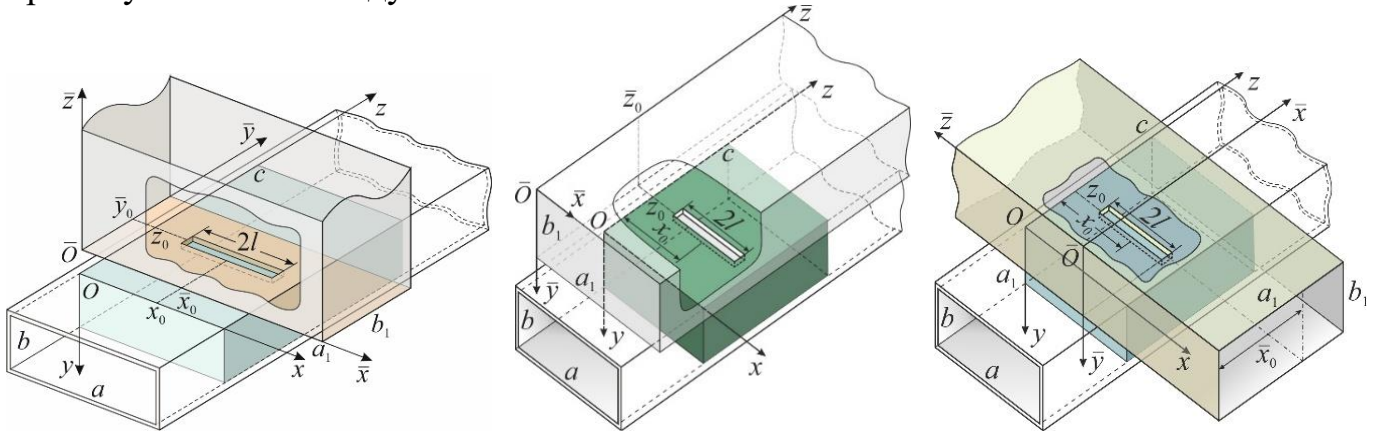


Рис.9. Хвилевідні зчленування з діелектричними вставками й імпедансними поверхнями

Встановлено, що для заданої довжини хвилі підбором електричних параметрів хвилевідних пристроїв (будь-якого з розглянутих типів) можна забезпечити в інтервалі $0 \leq |S_e|^2 \leq 0,84$ необхідний рівень передачі потужності з основного хвилеводу в бічний. Також показано, що регулювання в широких межах рівня передачі потужності в бічній хвилевід можна забезпечити, як зміною величини діелектричної проникності вставки, так і величини імпедансу, розподіленого на торці бічного хвилеводу. Незалежно від електродинамічного типу бічного хвилеводу для регулювання рівня передачі потужності в межах $0 \leq |S_e|^2 \leq 0,84$ виявляються достатніми малі зміни величини діелектричної проникності вставки порядку декількох одиниць відсотків)

Сформульовано загальну резонансну умову для зазначених типів хвилевідних зчленувань з діелектричною вставкою в області щілини зв'язку. В результаті моделювання встановлено, що для діелектриків з тангенсом кутів діелектричних втрат $\text{tg} \delta \leq 0,1$ похибка визначення резонансної довжини хвилі λ_{res} з отриманої резонансної умови у разі ігнорування в розрахунках уявної частини діелектричної проникності матеріалу вставки не перевищує $0,01\lambda_{res}$.

У четвертому розділі «Випромінювання й розсіювання електромагнітних хвиль вібраторно-щілинними структурами на сферичних поверхнях» розв'язано дві ключові задачі: 1) задача про випромінювання електромагнітних хвиль щілиною в ідеально провідній сфері, збуджуваною напівнескінченним прямокутним хвилеводом з імпедансним покриттям торця; прямокутним хвилеводом через прохідний резонатор з однощілинною та двощілинною резонансною діафрагмою (Рис. 10а,б.); 2) задача про розподіл струму й збудження електромагнітних хвиль

радіальним імпедансним вібратором на сфері. На підставі розв'язку цих ключових задач досліджена комбінована вібраторно-щілинна структура, що являє собою елемент Клевина на сфері (Рис. 10в).

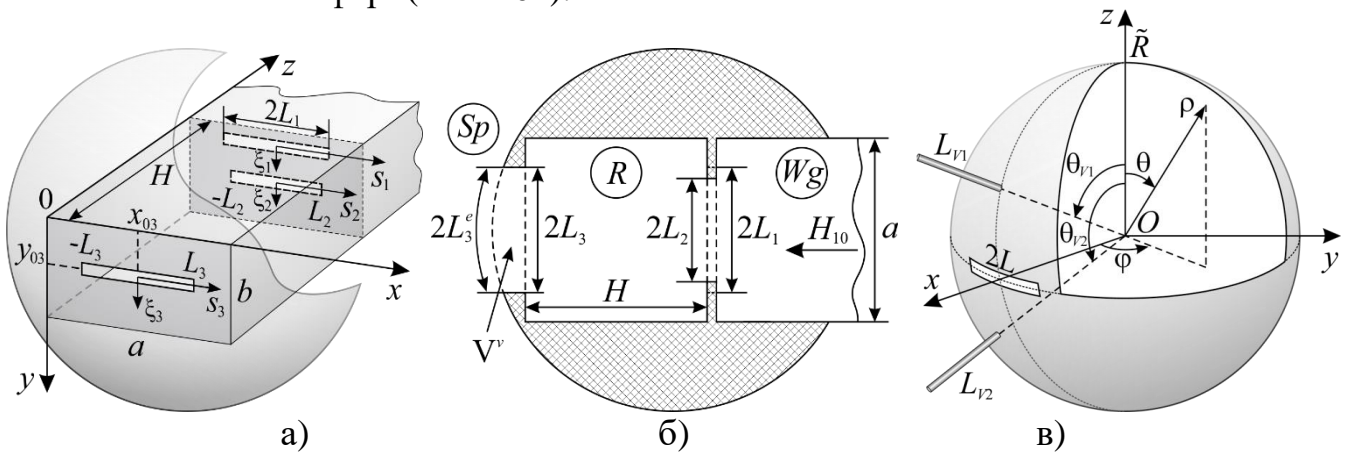


Рис.10. Щілинний та комбінований сферичні випромінювачі

Задачу про випромінювання електромагнітних хвиль у простір над ідеальною провідною сферою через апертуру вузької щілини, прорізаної в торці напівнескінченного прямокутного хвильоводу розв'язано узагальненим методом наведених МРС за умови збудження хвильовідної секції хвилею типу H_{10} . Особливостями розв'язку задачі є використання в якості єдиної базисної функції функціональної залежності аналітичного розв'язку інтегрального рівняння, попередньо отриманого асимптотичним методом усереднення для задачі дифракції хвиль на поперечній щілині, прорізаний в торці напівнескінченного прямокутного хвильоводу, яка випромінює в півпростір над ідеальним екраном і використання поняття еквівалентної ширини щілини, яке дозволяє виключити необхідність визначення полів у внутрішній порожнині щілини. При цьому магнітний струм у щілині визначається на підставі одного інтегрального рівняння, а не традиційної системи із двох рівнянь, записаних на обох апертурах порожнини щілини. Обґрунтована математична коректність такого наближеного розв'язку задачі. Очевидною перевагою запропонованого підходу є збереження можливості використання локальних систем координат в електродинамічних об'ємах, що сполучаються. Це дозволило визначити поля в просторі поза сферичним розсіювачем і усередині хвильовідної секції за допомогою відповідних функцій Гріна.

У якості керуючого елемента в побудованій моделі сферичного щілинного випромінювача розглядається імпедансне покриття плівкового типу, розподілене на торці хвильовідної секції. Передбачається, що за допомогою зовнішнього гіпотетичного впливу можуть бути змінені значення матеріальних параметрів магнітодіелектрика, з якого виконано це покриття, а отже, і значення поверхневого імпедансу плівкового елемента.

У підсумку було продемонстровано розрахунками, що варіювання значення імпедансу торцевого покриття хвильовідної секції дозволяє керувати енергетичними параметрами щілинного сферичного випромінювача в досить широких межах. Так виявилось, що можлива реалізація перебудови довжини хвилі резонансного

випромінювання антени при збереженні її вхідного узгодження в межах (30-36) %, що відповідає половині діапазону одномодового режиму хвильоводу. Такий результат доводить ефективність і перспективність застосування на практиці розглянутого способу керування енергетичними параметрами сферичних випромінювачів зазначеного типу.

Фізична адекватність побудованої математичної моделі для сферичного випромінювача була підтверджена експериментальними даними, отриманими для макетного зразка (Рис. 11а, б).

Досліджено вплив радіуса сфери на енергетичні параметри щілинного випромінювача. Показано, що добром довжини щілинного випромінювача та значення імпедансу торцевої стінки хвильоводу можна забезпечити максимальний рівень його випромінювання на будь-якій заданій частоті в діапазоні одномодового режиму хвильоводу для сферичного випромінювача будь-якого заданого радіуса. Визначено, що при розрахунках енергетичних характеристик сферичної антени в околиці резонансу використання провідності щілини в нескінченному екрані стає коректним уже для $kR \geq 10$. Однак удалині від резонансу, розрахунки діапазонних залежностей характеристик щілинних сферичних антен із задовільною для практики точністю можна робити в наближенні ідеального екрана тільки за умови $kR \geq 50$. Обґрунтована можливість використання в дизайні сферичних антен хвильоводів із заниженою висотою поперечного перерізу. Отримані результати можуть бути безпосередньо використані при проєктуванні й розробці щілинних сферичних антен.

Розміщення у хвильовідному тракті прохідного резонатора ($H = a/2$) суттєво підвищує добротність системи, при цьому резонансна крива має велику крутість, а її форма наближається до прямокутної (Рис. 11в). Наявність у діафрагмі другої щілини приводить до того, що на певній довжині хвилі, що залежить від довжини щілини $2L_2$ і її положення y_{02} , у системі відбувається повне відбиття ($|S_{11}| = 1,0$, $|S_{\Sigma}|^2 = 0$) падаючої на діафрагму хвилі типу H_{10} . При цьому смуга пропускання за рівнем $0,5|S_{\Sigma}|^2$ суттєво звужується (до 50 %) в порівнянні з випадками одно- і двохщілинних структур, а в області більш коротких довжин хвиль має місце зростання коефіцієнта випромінювання, положення максимуму якого також залежить від геометричних розмірів і положення щілини S_2 в стінці діафрагми.

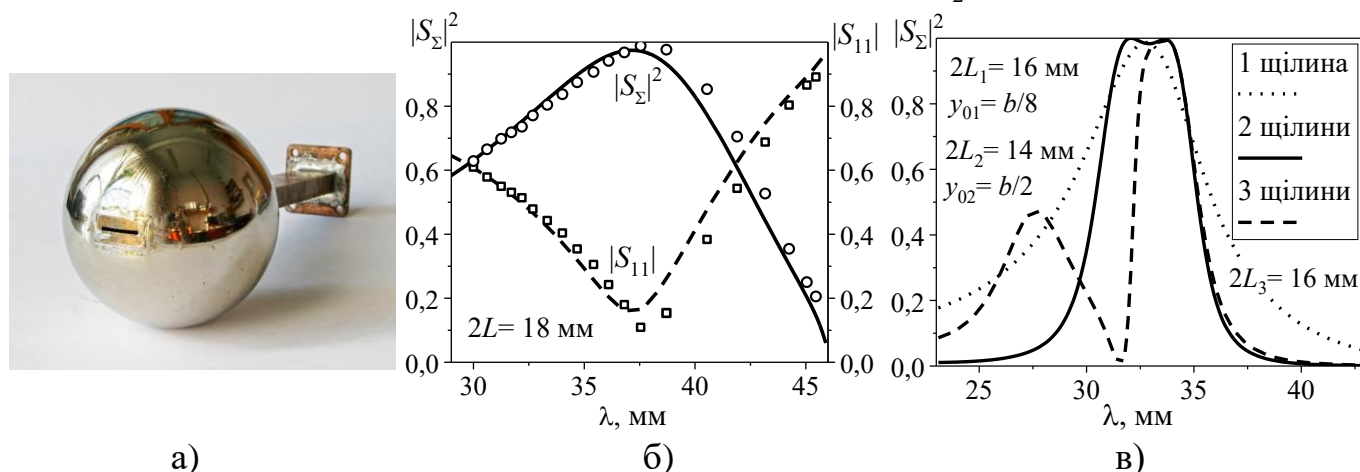
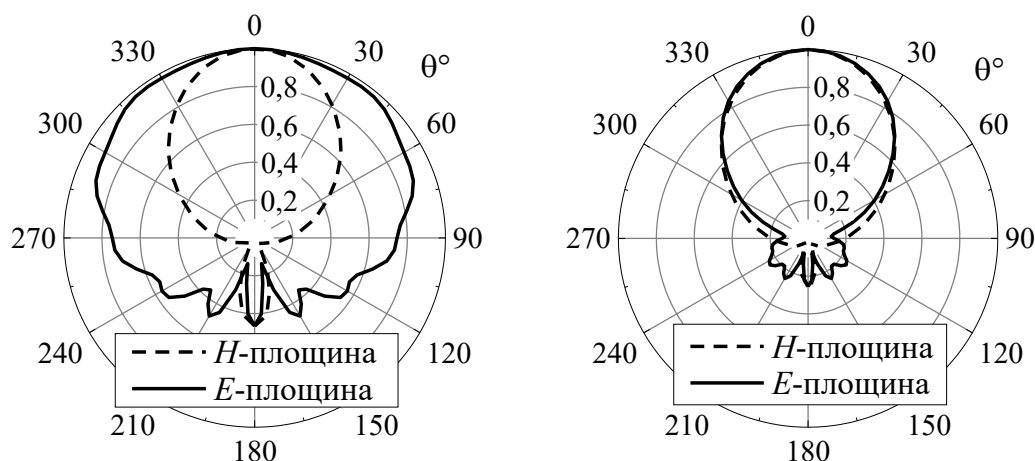


Рис.11. Розрахункові й експериментальні характеристики сферичних випромінювачів ($R=50$ мм, $a=23$ мм, $b=10$ мм, $h=1$ мм)



а) щілина на сфері

б) випромінювач типу Клевіна на сфері

Рис.12. Діаграми спрямованості сферичних випромінювачів ($R = \lambda$)

У випадку випромінювача Клевіна на сфері (Рис. 10в) показано, що для забезпечення подібних ДС у двох площинах (Рис. 12) для певного радіуса сфери необхідно підбирати конкретну довжину монополів. Геометричні параметри випромінювача Клевіна, при яких забезпечується подібність ДС у двох площинах, визначені для нескінченного екрана зберігаються для сфер з $kR \geq 20$.

У п'ятому розділі «Формування електромагнітних полів антенними решітками з імпедансними вібраторними та щілинними елементами та багаточастотними випромінювачами» побудовано математичні моделі та досліджено електродинамічні характеристики комбінованих щілинно-вібраторних структур типу Ягі-Уда з імпедансними випромінювачами, що поєднують щілину, прорізану у стінці прямокутного хвильоводу та систему пасивних імпедансних вібраторів або монополів. Показано (Рис. 13), що при оптимізації параметрів випромінювачів досліджувана структура дозволяє отримати діаграму спрямованості, подібну до ДС директорної антени (решітки Ягі-Уда). При цьому забезпечується добре узгодження з хвильовідним трактом ($K_{СХН} < 1,1$).

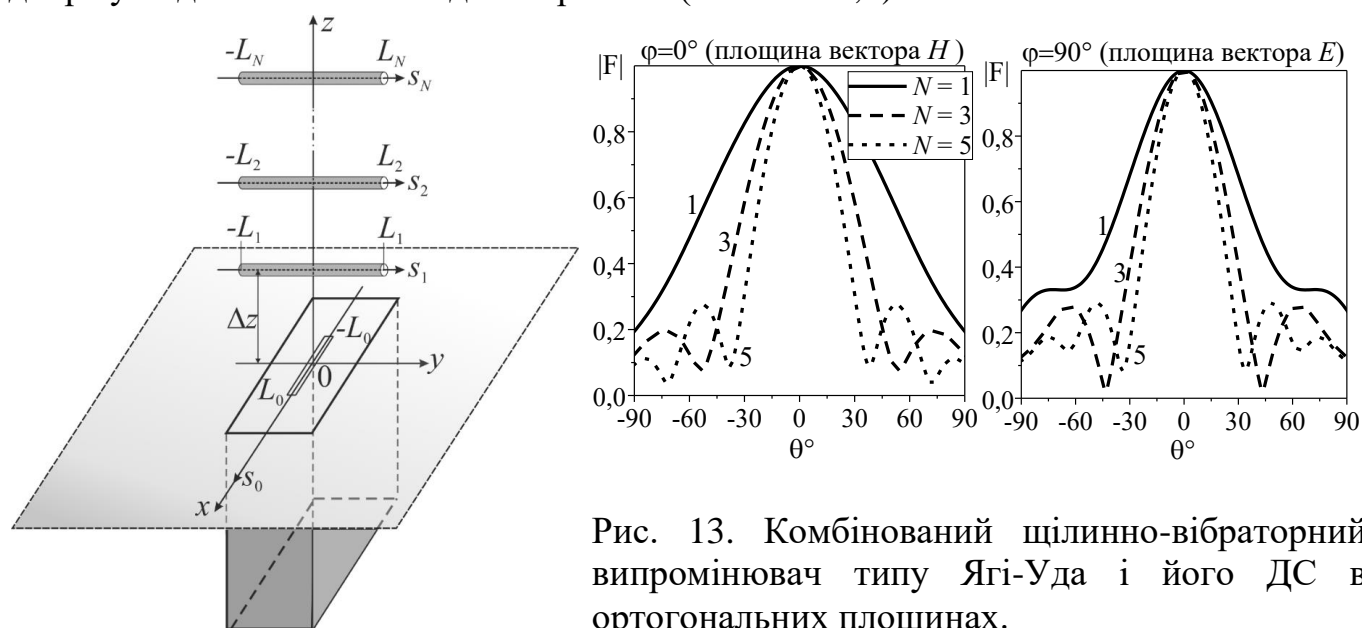


Рис. 13. Комбінований щілинно-вібраторний випромінювач типу Ягі-Уда і його ДС в ортогональних площинах.

Обґрунтовано використання комбінованих вібраторно-щілинних випромінювачів, що мають подібні діаграми спрямованості в основних площинах, як елементів двочастотних антенних решіток. Таке застосування реалізується за допомогою діодної комутації активності щілинних і вібраторних елементів. На основній частоті запропоновано використовувати традиційні комбіновані випромінювачі з пасивними вібраторами, а на альтернативній – активні вібраторні елементи. Проаналізовано особливості формування полів випромінювання суміщених структур на основній і альтернативній частотах. Показано можливість їх використання в суміщених двочастотних антенних решітках. Для елементів Клевіна проаналізовано особливості формування полів випромінювання суміщеної решітки на основній і альтернативній частотах.

Реалізовано ідею створення багаточастотного випромінювача на основі електрично довгої щілини. Розв'язано задачі збудження та випромінювання електромагнітних полів електрично довгою щілиною, прорізаною у вузькій стінці скінченної товщини багатомодового прямокутного хвилеводу з урахуванням діелектричного заповнення порожнини щілини. Задачу з визначення розподілу поля на поверхнях щілини розв'язано узагальненим методом наведених МРС із застосуванням обмеженої кількості тригонометричних базисних функцій. Показано, що заповнення порожнини електрично довгої щілини діелектриком дозволяє зменшити рівень бічних пелюсток ДС, збільшити коефіцієнт спрямованої дії та коефіцієнт підсилення випромінювача при збудженні хвилеводу як основним, так і вищими типами хвиль. Це дало змогу реалізувати на основі такої електрично довгої щілини багаточастотний випромінювач при збудженні хвилеводу хвилями H_{10} , H_{20} і H_{30} на різних частотах. При цьому напрямки максимального випромінювання для трьох частот співпадають.

У шостому розділі «Імпедансний синтез антенних решіток» запропоновано новий метод імпедансного синтезу ДС випромінювання антенних решіток, що базується на імпедансній концепції. Розв'язано задачі імпедансного синтезу для антенних решіток з тонких лінійних випромінювачів: решіток симетричних імпедансних вібраторів, збуджуваних зосередженими генераторами напруг, плоских двовимірних дифракційних вібраторних решіток, плоскої двовимірної щілинної антенної решітки. Для решіток з подвійною періодичністю отримано розв'язки задач імпедансного синтезу в аналітичному вигляді. Отримані формули дозволяють безпосередньо розраховувати значення імпедансів кожного з елементів решітки, що забезпечують можливість повернути максимум ДС решітки у хвильовій зоні в заданому напрямку. Відповідні вирази для дійсної і уявної частин нормованих імпедансів $\bar{Z}_{nm} = \bar{R}_{nm} + i\bar{X}_{nm}$ у випадку решітки імпедансних вібраторів, збуджуваних зосередженими генераторами напруг та плоских двовимірних дифракційних вібраторних решіток наведено нижче, формули (2) і (3) відповідно.

$$\bar{R}_{nm} = \frac{k_1 \rho_{nm} \sin(k_1 \chi_{nm})}{\alpha_{nm} \left(\frac{1 + \cos^2 \theta_{\max}}{\sin^2 \theta_{\max}} - \frac{k_1 L \sin(k_1 L)}{Fc(\theta_{\max})} \right)}; \quad \bar{X}_{nm} = \frac{-k_1 \rho_{nm} [1 - \cos(k_1 \chi_{nm})]}{\alpha_{nm} \left(\frac{1 + \cos^2 \theta_{\max}}{\sin^2 \theta_{\max}} - \frac{k_1 L \sin(k_1 L)}{Fc(\theta_{\max})} \right)}. \quad (2)$$

$$n = 1, 2, \dots, N_z; \quad m = 1, 2, \dots, N_x;$$

$$\begin{aligned}\bar{R}_{nm} &= \frac{k_1 \rho}{\alpha D} \left\{ \alpha \operatorname{Im}(P^s) [1 - \cos(k_1 \chi_{nm})] \right. \\ &\quad \left. - \sin(k_1 \chi_{nm}) [\cos(k_1 L) + \alpha \operatorname{Re}(P^s)] \right\}, \quad n = 1, 2 \dots N_x; \\ \bar{X}_{nm} &= \frac{k_1 \rho}{\alpha D} \left\{ \alpha \sin(k_1 \chi_{nm}) \operatorname{Im}(P^s) \right. \\ &\quad \left. + [1 - \cos(k_1 \chi_{nm})] \times [\cos(k_1 L) + \alpha \operatorname{Re}(P^s)] \right\}, \quad m = 1, 2 \dots N_y.\end{aligned}\quad (3)$$

Тут $(\theta_{\max}; \varphi_{\max})$ – кути напрямку максимального випромінювання, $\rho_{nm} = \rho$ – величини радіусів вібраторів, $\alpha_{nm} = \frac{1}{2 \ln[\rho_{nm} / (2L)]}$ – природні малі параметри,

$$\begin{aligned}k_1 &= k \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \quad \text{і} \quad k = \omega / c \quad - \quad \text{хвильові числа}, \quad Fc(\theta) = \cos(k_1 L \cos \theta) - \cos(k_1 L), \\ \chi_{nm} &= [(n-1)d_z \cos \theta_{\max} + (m-1)d_x \sin \theta_{\max} \cos \varphi_{\max}], \\ P^s(k_1 \rho_{nm}, k_1 L) &= \cos k_1 L [2 \ln 2 - \gamma_{nm}(L) - (1/2) \operatorname{Cin}(2k_1 L) - (i/2) \operatorname{Si}(4k_1 L)] + \\ &\quad + \sin k_1 L [(1/2) \operatorname{Si}(4k_1 L) - (i/2) \operatorname{Cin}(4k_1 L)],\end{aligned}$$

$$D = \frac{C \tilde{f}_2(\theta) \sin^2 \theta - \tilde{f}_1(\theta) [2C - k_1 L \sin(k_1 L) \sin^2 \theta]}{\tilde{f}_1(\theta) \sin^2 \theta} \Big|_{\theta=\theta_{\max}}.$$

Слід зауважити, що формули (2), (3) є вірними для будь-якої кількості вібраторів у решітці і довільної відстані між ними. Однак при цьому обчислені значення імпедансів $\bar{Z}_{nm} = \bar{R}_{nm} + i\bar{X}_{nm}$ у загальному випадку не можуть гарантувати позитивність їх реальних частин: $\bar{R}_{nm} \geq 0$ (вимогу, яка висувається з енергетичних міркувань). Тому отримані імпеданси з $\bar{R}_{nm} < 0$ тут потрібно інтерпретувати як ефективні фізичні величини, які можуть бути реалізовані тільки в результаті електродинамічних впливів на вібратор додатково внесених розсіювачів. Установлено, що в аналізованому випадку позитивні значення \bar{R}_{nm} спостерігаються, якщо реалізована різниця фаз струмів у крайніх випромінювачах решітки не перевищує значення 180° . Максимальний кут, на який при цьому може відхилитися ДС розсіювання (щодо нормалі) становить: $\Delta\varphi_{\max} = \arcsin(\lambda / (2d_x(N_x - 1)))$ або $\Delta\varphi_{\max} \approx [\lambda / (2d_x(N_x - 1))] \cdot 180^\circ / \pi$ при малих відхиленнях. Якщо зрівняти це значення із шириною ДС решітки за рівнем половинної потужності $\Delta\varphi_{0.5} \approx [\lambda / (d_x(N_x - 1))] \cdot 51^\circ$, то теоретичні рівні максимальних відхилень будуть становити $\Delta\varphi_{\max} \approx \pm 0.56 \cdot \Delta\varphi_{0.5}$.

Метод імпедансного синтезу ДС випромінювання, розроблений для вібраторних структур, за допомогою принципу дуальності узагальнено на випадок щілинних двовимірних плоских решіток. Щілини збуджуються в центральній частині своїх апертур дельта-генераторами напруги. Для вузьких щілин, що мають навантаження у вигляді порожнин резонаторів з магнітно-діелектричним заповненням, розв'язано задачу конструктивної реалізації імпедансу магнітного типу.

У строгій електродинамічній постановці отримано числово-аналітичний розв'язок зворотної задачі дифракції щодо величини магнітної проникності матеріалу вставки в порожнині щілини, прорізаної в плоскому екрані скінченної товщини, яка використовується як елемент маскувального покриття. Отримано асимптотичний вираз для розрахунків величини магнітної проникності матеріалу вставки в порожнині щілини при забезпеченні нею функції радіомаскування. У випадку взаємодії вузької щілини з розсіювальним вібратором обґрунтована можливість застосування щілини у якості функціонального елемента маскувального покриття. Визначено, що при цьому матеріал щілинної вставки повинен мати властивості спеціального метаматеріалу – магнетика гібридного типу.

У висновках подано основні результати дисертаційної роботи.

У додатках наведено список публікацій здобувача за темою дисертації, вирази для функцій Гріна розглянутих електродинамічних об'єктів та вирази для визначення поверхневих імпедансів електрично тонких вібраторів.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної проблеми радіофізики, яка полягає у розвитку теорії комбінованих випромінювачів магнітно-електричного типу, а також їх багатоелементних систем, побудові на основі інтегральних рівнянь макроскопічної електродинаміки фізично коректних математичних моделей для їхнього дослідження, розробці й узагальненню числово-аналітичних методів розв'язання відповідних крайових задач математичної фізики, що дозволяють провести строгий електродинамічний аналіз комбінованих структур, які складаються з електричних і магнітних випромінювачів: тонких імпедансних вібраторів (у загальному випадку з нерегулярними вздовж них геометричними й електрофізичними параметрами) та вузьких щілин, а також їх багатоелементних систем, розташованих у різних електродинамічних об'єктах з імпедансними границями (включаючи покриття з метаматеріалу) та заповнених матеріальним середовищем. Вирішення зазначеної проблеми розкриває додаткові можливості для формування електромагнітних полів із заданими характеристиками у всіх зонах випромінювання, а також сприяє розвитку новітньої елементної бази антенно-хвильових пристроїв метрового, дециметрового та міліметрового діапазонів довжин хвиль, створенню нових або істотному покращенню робочих характеристик діючих радіотехнічних та радіоелектронних пристроїв для різних галузей застосування.

Основні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

– створено нові та розвинено і модифіковано існуючі математично обґрунтовані чисельно-аналітичні методи розв'язання відповідних крайових задач електродинаміки, розроблено високоефективні математичні моделі, методи й алгоритми розрахунку характеристик випромінювачів, ефективні для застосування в системах автоматизованого проектування, які дозволяють на строгому електродинамічному рівні здійснювати побудову математичних моделей реальних магнітно-електричних випромінюючих структур, що реалізуються на базі хвильово-щілинних та імпедансних вібраторних випромінювачів з довільними

геометричними й електрофізичними параметрами, розташованих в різноманітних електродинамічних об'єктах, зокрема з імпедансними границями;

– виявлено нові фізичні явища, властивості та закономірності формування такими випромінюючими структурами електромагнітного поля із зазначеними просторово-енергетичними, частотними та іншими електродинамічними характеристиками.

Ці два аспекти включають такі результати роботи:

1. Запропоновано нові аспекти в розвитку теорії електрично тонких випромінювачів: введено до електродинамічного аналізу електрично тонких випромінювачів нові поняття ефективних наведених імпедансів електричного та магнітного типів, що дозволило сформулювати струмові інтегральні рівняння для випромінювачів електричного та магнітного типів у дуально-симетричній формі.

2. Уперше розв'язано задачі збудження та випромінювання електромагнітних полів поперечною та поздовжньою щілинами в широкій стінці прямокутного хвильоводу, усередині й зовні якого розташовано імпедансні вібратори (монополі), з урахуванням повної взаємодії між усіма елементами вібраторно-щілинних структур. Особливостями розв'язання задач є використання в методі наведених ЕМРС для визначення розподілу електричних і магнітних струмів на елементах структур розв'язків, попередньо отриманих асимптотичним методом усереднення та врахування змінного вздовж вібраторів поверхневого імпедансу.

2.1. У випадку поперечної щілини в широкій стінці прямокутного хвильоводу, усередині якого розташовано два імпедансних монополі, вперше:

– виявлено, що при розташуванні монополів безпосередньо під щілиною, вони практично не впливають на коефіцієнт випромінювання структури, в той же час вібратори з різними значеннями поверхневого імпедансу або з різними розподілами імпедансу вздовж них дозволяють оптимізувати вхідне узгодження випромінювача або отримати високодобротні резонанси відбиття від структури на заданій довжині хвилі, за допомогою чого можна реалізувати однобічну фільтрацію сигналу.

– визначено умови реалізації максимального коефіцієнта випромінювання, близького до одиниці, який спостерігається при зміщенні осі одного з вібраторів відносно осі щілини на величину кратну $z_0 = \lambda_g / 2$ та забезпеченні близьких значень резонансних частот щілини й вібратора, що реалізується при використанні монополів зі змінними уздовж них індуктивними імпедансами.

– виявлено що зміщення монополя у площині поперечного перерізу хвильоводу при $z_0 = \lambda_g / 2$ зумовлює зміну ширини смуги частотної залежності коефіцієнта випромінювання структури яка змінюється майже втричі при незначній (біля 5 %) зміні максимального значення коефіцієнта випромінювання.

2.2. Узагальненим методом наведених ЕМРС розв'язано задачі з визначення струмів в елементах хвильовідних комбінованих вібраторно-щілинних структур, які містять два монополі, в загальному випадку зі змінним уздовж них поверхневим імпедансом, розміщені поза хвильоводом по обидва боки щілини, на певній відстані від неї, які дозволяють сформувати поля випромінювання, як у випадку випромінювача Клевіна. Для таких структур вперше:

- визначено оптимальні параметри випромінювача (L_v , x_d , \bar{Z}_s) при випромінюванні у півпростір над нескінченною площиною для одержання ДС із однаковою шириною в E - і H -площинах, ДС із найбільш низьким рівнем бічного випромінювання, для забезпечення максимально близьких за шириною ДС в E - і H -площинах при заданому рівні бічного випромінювання;

- показано, що оптимальна ДС випромінювача Клевіна з напівхвильовою щілиною може бути реалізована тільки при досить малому коефіцієнті випромінювання $|S_z|^2 < 0,1$, оскільки компенсація в дальній зоні поля випромінювання щілини (уздовж площини) дифракційними полями вібраторів одночасно супроводжується придушенням власного поля в щілині;

- визначено, що підвищити коефіцієнт випромінювання структури з поздовжньою щілиною до $|S_z|^2 \approx 0,4 \div 0,49$ при збереженні подібних ДС в E - і H -площинах дозволяє збільшення довжини щілини на (15-20) % у порівнянні з її резонансною довжиною при відповідній зміні довжин вібраторів та розташування усередині хвильоводу додаткового імпедансного вібраторного настроювального елемента.

- вперше отримано рівняння параметричного типу щодо визначення реактивного імпедансу настроювального монополя всередині хвильоводу для структури з поперечною щілиною, при якому забезпечується резонансний режим випромінювання структури та побудовано наближений аналітичний розв'язок такого рівняння в окремому випадку.

3. Уперше розв'язано задачі збудження електромагнітних полів у хвильовідних E -площинних T -подібних зчленуваннях нескінченного й напівнескінченного хвильоводів (з однаковими та різними розмірами поперечних перерізів) через поперечну щілину в широкій стінці нескінченного хвильоводу, усередині якого розміщено імпедансний монополь (пара монополів), а поверхня торця напівнескінченного хвильоводу може бути також імпедансною (включаючи покриття з метаматеріалу). В результаті числового моделювання вперше:

- визначено умови збільшення коефіцієнта передачі за потужністю в бічний хвильовід P_{13} на резонансній довжині хвилі щілини й монополя, що має місце при розташуванні імпедансного монополя усередині основного хвильоводу при величинах зсуву осі вібратора щодо осі щілини кратних $\lambda_G^{Sres} / 8$ при одночасному зменшенні величин P_{12} і P_{11} , максимальне значення P_{13} (до 90 %) спостерігається при $z_0 = \lambda_G^{Sres} / 2$;

- виявлено, що зсув монополя в площині поперечного перерізу хвильоводу приводить до розширення ширини смуги передатної характеристики $P_{13}(\lambda)$ на 70 %.

- визначено умови поділу потужностей хвиль, що пройшли, у заданому співвідношенні на певній довжині хвилі всього робочого діапазону хвильоводу при задовільному ($K_{СХН} \leq 2,0$) узгодженні в плечі 1 при використанні монополів однакової довжини, але з різними значеннями та законами розподілу поверхневого імпедансу;

– визначено умови рівного поділу падаючої потужності між модами H_{10} , H_{20} або H_{30} в бічному хвилеводі (за умови його багатомодового функціонування) в інтервалах частот (причому на окремих частотах коефіцієнт передачі за потужністю в бічне плече досягає значення 90 %) та умови рівного поділу падаючої потужності між усіма фізичними каналами поділу потужності на окремих частотах при задовільному ($K_{CXH} \leq 2,0$) узгодженні в плечі 1;

– виявлено, що покриття торця бічного хвилевідного плеча метаматеріалом LR-5I, яке має частотно залежний різнотипний імпеданс може забезпечувати трьохрезонансний режим передачі потужності з основного хвилеводу в бічний.

4. Уперше розв'язано задачі збудження електромагнітних полів у хвилевідних зчленуваннях з діелектричними вставками й імпедансними поверхнями, де в якості бічних плечей пристроїв розглянуто: Т-орієнтований напівнескінченний хвилевід з імпедансним торцем; напівнескінченний співвісний хвилевід; перпендикулярно схрещений нескінченний прямокутний хвилевід.

Визначено, що для заданої довжини хвилі підбором електричних параметрів хвилевідних пристроїв можна забезпечити в інтервалі $0 \leq |S_e|^2 \leq 0,84$ необхідний рівень передачі потужності з основного хвилеводу в бічний. Причому для регулювання рівня передачі потужності в зазначених межах виявляються достатніми зміни величини діелектричної проникності вставки в декілька одиниць відсотків.

Уперше сформульовано загальну резонансну умову для зазначених типів хвилевідних зчленувань з діелектричною вставкою в області щілини зв'язку та встановлено, що для діелектриків з тангенсом кутів діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta \leq 0,1$ похибка визначення резонансної довжини хвилі λ_{res} з отриманої резонансної умови у разі ігнорування в розрахунках уявної частини діелектричної проникності матеріалу вставки не перевищує $0,01\lambda_{res}$.

5. Уперше розв'язано задачі збудження та випромінювання електромагнітних хвиль вузькою резонансною щілиною, прорізаною в ідеально провідній сфері довільного радіуса, збуджуваною напівнескінченим прямокутним хвилеводом з імпедансним торцем або прямокутним хвилеводом з одно- і двохщілинним прохідним резонатором. Особливостями розв'язання задачі є використання в якості єдиної базисної функції функціональної залежності в методі наведених МРС аналітичного розв'язку інтегрального рівняння, попередньо отриманого асимптотичним методом усереднення і використання поняття еквівалентної ширини щілини d_e , яке дозволяє виключити необхідність визначення полів у внутрішній порожнині щілини.

Визначено, що при розрахунках енергетичних характеристик сферичного випромінювача в околиці резонансу використання провідності щілини в нескінченному екрані стає коректним для $kR \geq 10$, тоді як вдалині від резонансу – для $kR \geq 50$.

Виявлено, що зміна значень матеріальних параметрів магнітодіелектрика, з якого виконано імпедансне покриття торця хвилеводу, а отже, і значень його поверхневого імпедансу дозволяє перебудову довжини хвилі резонансного

випромінювання випромінювача при збереженні його вхідного узгодження в межах (30-36) %, що відповідає половині діапазону одномодового режиму хвилеводу.

Визначено, що розміщення у хвилевідному тракті прохідного резонатора суттєво підвищує добротність системи, при цьому резонансна крива має велику крутість, а її форма наближається до прямокутної. Наявність у діафрагмі другої щілини приводить до звуження смуги пропускання за рівнем половинної потужності випромінювання до 50 % та повного відбиття падаючої на діафрагму хвилі типу H_{10} на певній довжині хвилі, що залежить від довжини щілини і її положення.

6. Уперше розв'язано задачу формування електромагнітних полів структурою, що складається з резонансної щілини в ідеально провідній сфері довільного радіуса й двох радіальних імпедансних вібраторів.

Показано, що для випромінювача типу Клевіна на сфері необхідна довжина монополів, при якій забезпечується подібність ДС у двох площинах залежить від радіуса сфери. Геометричні параметри випромінювача Клевіна, визначені для нескінченного екрана зберігаються для сфер з $kR \geq 20$.

7. Уперше узагальненим методом наведених ЕМРС визначено розподіли струмів в багатоеlementній комбінованій щілинно-вібраторній решітці з імпедансними випромінювачами, що поєднує щілину, прорізану у стінці прямокутного хвилеводу та систему пасивних імпедансних вібраторів, розміщених над щілиною у вільному півпросторі.

Виявлено, що при оптимізації параметрів випромінювачів така система дозволяє отримати діаграму спрямованості, подібну до ДС директорної антени (решітки Ягі-Уда). При цьому забезпечується добре узгодження з хвилевідним трактом ($K_{СХН} < 1,1$).

8. Обґрунтовано використання комбінованих вібраторно-щілинних випромінювачів, що мають подібні діаграми спрямованості в основних площинах, як елементів двочастотних антенних решіток, що реалізовано за допомогою діодної комутації активності щілинних і вібраторних елементів.

9. Уперше реалізовано багаточастотний випромінювач на основі електрично довгої щілини, заповненої діелектриком, у вузькій стінці скінченної товщини багатомодового прямокутного хвилеводу при збудженні хвилеводу хвилями H_{10} , H_{20} і H_{30} на різних частотах. При цьому напрямки максимального випромінювання для трьох частот співпадають.

10. Запропоновано новий метод імпедансного синтезу ДС випромінювання антенних решіток з імпедансними вібраторними елементами. Уперше отримано аналітичні формули для дійсної і уявної частин поверхневих імпедансів вібраторних елементів випромінюючих і дифракційних решіток, які забезпечують формування максимуму ДС випромінювання решіток у заданному напрямку.

11. Метод імпедансного синтезу ДС випромінювання, розроблений для вібраторних структур, за допомогою принципу дуальності узагальнено на випадок щілинних двовимірних плоских решіток, у яких щілини збуджуються в центральній частині своїх апертур дельта-генераторами напруги та мають навантаження у вигляді порожнин резонаторів з магнітно-діелектричним заповненням.

Розв'язано задачу конструктивної реалізації імпедансу магнітного типу.

12. Відповідність побудованих моделей реальним фізичним процесам підтверджено порівнянням з експериментальними даними, відомими з літературних джерел, і оригінальними результатами експериментальних досліджень для вібраторних, щілинних і комбінованих структур.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії, розділи монографій:

1. Thin Impedance Vibrators. Theory and Applications / M. V. Nesterenko, V. A. Katrich, Yu. M. Penkin, V. M. Dakhov, **S. L. Berdnik**. – New York: Springer Science+Business Media, 2011. – 223 p. (Scopus)
Внесок здобувача: розв'язання задач збудження електромагнітних полів, визначення розподілу електричних струмів узагальненим методом наведених МРС, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз отриманих результатів.
2. Теория волноводно-щелевых излучающих структур : монография / В.А. Катрич, В. А. Лященко, М. В. Нестеренко, Л. П. Яцук, **С. Л. Бердник** – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина. – 2014. – 400 с.
Внесок здобувача: розв'язання задач збудження та випромінювання для електрично довгих щілин та антенних решіток, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз отриманих результатів.
3. Формирование электромагнитных полей комбинированными вибраторно-щелевыми структурами: монография / **С. Л. Бердник**, В. А. Катрич, М. В. Нестеренко, Ю. М. Пенкин – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2018. – 336 с.
Внесок здобувача: постановка та розв'язання граничних задач, вибір методу їхнього розв'язання, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.
4. Electromagnetic Fields Excited in Volumes with Spherical Boundaries // Yu. M. Penkin, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, **S. L. Berdnik**, V. M. Dakhov. – Springer. – 2019. – 198 p. (Scopus).
Внесок здобувача: постановка та розв'язання задач збудження і випромінювання для комбінованих вібраторно-щілинних випромінювачів на сферичних поверхнях, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.
5. Combined Vibrator-Slot Structures: Theory and Applications / M. V. Nesterenko, V. A. Katrich, Yu. M. Penkin, **S. L. Berdnik**, O. M. Dumin. – Springer, Cham, Switzerland, 2020. – 344 p. (Scopus).
Внесок здобувача: постановка та розв'язання задач збудження та випромінювання для вібраторно-щілинних структур у прямокутному хвилеводі, хвилевідних зчленуваннях, на сфері, проведення комп'ютерного моделювання, аналіз та узагальнення отриманих результатів.
6. Electromagnetic Waves Excitation by Thin Impedance Vibrators and Narrow Slots in Electrodynamical Volumes / M. V. Nesterenko, **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, Yu. M. Penkin. Chapter in book “Advanced Electromagnetic Waves”, S. O. Bashir (ed.), Rijeka: InTech. – 2015. – Chapter 6. – P. 147–175.

Внесок здобувача: постановка та розв'язання граничних задач, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

7. Створення вібраторних та щілинних випромінюючих структур із заданими частотно-просторово-енергетичними характеристиками / В. О. Катрич, М. В. Нестеренко, **С. Л. Бердник**, Ю. М. Пенкін // Випромінюючі структури багатофункціональних радіоелектронних систем: теорія і застосування / за ред. В.О. Катрич. – Lambert Aca-demic Publishing. – 2017. – Розд. 2. – С. 35–70.

Внесок здобувача: розв'язання задач щодо електрично довгих щілин, хвилевідно-щілинних антенних решіток, комбінованих вібраторно-щілинних структур, проведення комп'ютерних розрахунків, узагальнення отриманих результатів.

Наукові праці у фахових виданнях України:

8. **Бердник С. Л.** Система вибраторов с переменным поверхностным импедансом в свободном пространстве / **С. Л. Бердник** // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. – 2012. – Вип. 20, №1010. – С. 23–27.
9. **Бердник С. Л.** Излучение электромагнитных волн электрически длинной щелью с диэлектрическим заполнением в узкой стенке многомодового прямоугольного волновода / **С. Л. Бердник** // Радиотехника. Всеукр. межвед. научн.-техн. сб. – 2012. – Вып. 171. – С. 322–326 .
10. Использование концепции поверхностного импеданса в задачах электродинамики (75 лет спустя) / **С. Л. Бердник**, Д. Ю Пенкин, В. А. Катрич, Ю. М. Пенкин, М. В. Нестеренко // Радиофизика и радиоастрономия. – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 57–80.

Внесок здобувача: огляд літературних джерел щодо використання імпедансного підходу, аналіз меж коректного застосування імпедансних граничних умов, формулювання висновків.

11. Щелевая сферическая антенна с многоэлементной резонансной диафрагмой в волноводе / **С. Л. Бердник**, В. С. Васильковский, В. А. Катрич, М. В. Нестеренко, Ю. М. Пенкин // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. – 2014. – №1115, Вип. 24. – С. 35–40.

Внесок здобувача: постановка задачі, розв'язання граничної задачі, отримання виразів для зовнішньої провідності щілини, аналіз отриманих числових результатів, формулювання висновків.

12. Рассеяние электромагнитных волн системой вибраторов с переменным импедансом в прямоугольном волноводе / **С. Л. Бердник**, В. А. Катрич, В. И. Кийко, М. В. Нестеренко // Радиофизика и радиоастрономия. – 2015. – Т. 20, №1. – С. 64–75.

Внесок здобувача: постановка задачі, розв'язання задачі збудження, аналіз отриманих числових та експериментальних результатів, формулювання висновків.

13. Электродинамические характеристики щелевых сферических излучателей / **С. Л. Бердник**, В. А. Катрич, М. В. Нестеренко, Ю. М. Пенкин // Прикладная радиоэлектроника. – 2015. – Том 14, № 1. – С. 24–35.

Внесок здобувача: постановка задачі, розв'язання граничної задачі, отримання виразів для зовнішньої провідності щілини, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз отриманих числових результатів, формулювання висновків.

Наукові праці у зарубіжних спеціалізованих виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз:

14. Combined vibrator-slot structures in electrodynamic volumes / M. V. Nesterenko, V. A. Katrich, Y. M. Penkin, **S. L. Berdник**, and V. I. Kijko // Electromagnetic waves: Progress In Electromagnetics Research B, EMW Publishing, Cambridge, Massachusetts, USA. – 2012. – PIERB 37. – P. 237–256. (Scopus)

Внесок здобувача: розв'язання задач збудження електромагнітних полів у хвилеводі, участь у проведенні комп'ютерних і експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів.

15. Electromagnetic waves scattering and radiation by vibrator-slot structure in a rectangular waveguide / M. V. Nesterenko, V. A. Katrich, D. Y. Penkin, **S. L. Berdник**, and V. I. Kijko // Progress In Electromagnetics Research M. – 2012. – Vol. 24. – P. 69–84. (Scopus)

Внесок здобувача: розв'язання задачі випромінювання електромагнітних полів, участь у проведенні комп'ютерних і експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів.

16. Electromagnetic waves radiation into the space over a sphere by a slot in the end-wall of a semi-infinite rectangular waveguide / **S. L. Berdник**, Y. M. Penkin, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, V. I. Kijko // Electromagnetic waves: Progress In Electromagnetics Research B, EMW Publishing, Cambridge, Massachusetts, USA. – 2013. – Vol 46. – P. 139–158. (Scopus)

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задач збудження і випромінювання, отримання виразів для коефіцієнтів СЛАР, проведення комп'ютерних розрахунків та участь в експериментальних дослідженнях, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

17. Electromagnetic fields excitation by a multielement vibrator-slot structures in coupled electrodynamic volumes / D. Y. Penkin, **S. L. Berdник**, V. A. Katrich, M V. Nesterenko, V. I. Kijko // Electromagnetic waves: Progress In Electromagnetics Research B, EMW Publishing, Cambridge, Massachusetts, USA. – 2013. – Vol 49. – P. 235–252. (Scopus)

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задач збудження, проведення комп'ютерних розрахунків та участь в експериментальних дослідженнях, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

18. Energy Characteristics of a Slot Cut in an Impedance End-wall of a Rectangular Waveguide and Radiating into the Space over a Perfectly Conducting Sphere / **S. L. Berdник**, V. A. Katrich, Yu. M. Penkin, M. V. Nesterenko, S. V. Pshenichnaya // Electromagnetic waves: Progress In Electromagnetics Research M, EMW Publishing, Cambridge, Massachusetts, USA. – 2014. – Vol. 34. – P. 89–97. (Scopus)

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задач збудження і випромінювання, отримання виразів для коефіцієнтів СЛАР, проведення комп'ютерних розрахунків енергетичних характеристик, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

19. Electrodynamic Characteristics of a Radial Impedance Vibrator on a Perfect Conduction Sphere / D Yu. Penkin, V A. Katrich, Yu M. Penkin, M V. Nesterenko, V M. Dakhov, and **S L. Berdnik** // Electromagnetic waves: Progress In Electromagnetics Research B, EMW Publishing, Cambridge, Massachusetts, USA.– 2015. – Vol. 62. – P. 137–151. (Scopus)

Внесок здобувача: участь у розв'язанні задач збудження і випромінювання, отримання розрахункових формул, проведення комп'ютерних розрахунків електродинамічних характеристик, аналіз отриманих результатів.

20. E-Plane T-Junction of Rectangular Waveguides with Vibrator-Slot Coupling Between Arms / **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, Yu. M. Penkin // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015. – Vol. 74, Issue 14. – P. 1225–1240. (Scopus)

Внесок здобувача: постановка та розв'язання електродинамічних задач, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

Переклад англійською мовою статті у фаховому виданні:

Е-плоскостное сочленение прямоугольных волноводов с вибраторно-щелевой связью между плечами / **С. Л. Бердник**, В. А. Катрич, М. В. Нестеренко, Ю. М. Пенкин // Радиофизика и электроника. – 2015. – Т.6(20), № 1. – С.85–93.

21. Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves by a Multi-Element Vibrator-Slot Structure in a Rectangular Waveguide / **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, Yu. M. Penkin, and D. Yu. Penkin // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2015. – Vol. 63, No. 9. – P. 4256–4259. (Scopus)

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

22. Power Characteristics of a T-Junction of Rectangular Waveguides with a Multi-Element Monopole-Slotted Coupling Structure / **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, V. I. Kiyko, M. V. Nesterenko, Yu. M. Penkin // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016. – Vol. 75, Issue 6. – P. 489–506. (Scopus)

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

Переклад англійською мовою статті:

Энергетические характеристики Т-образного сочленения прямоугольных волноводов с многоэлементной вибраторно-щелевой структурой в области связи / **С. Л. Бердник**, В. А. Катрич, В. И. Кийко, М. В. Нестеренко, Ю. М. Пенкин // Радиофизика и электроника. – 2016. – Т.7(21), № 1, – С.4–14.

23. Electromagnetic Waves Radiation by a Vibrators System with Variable Surface Impedance / **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, Yu. M. Penkin // Electromagnetic waves: Progress In Electromagnetics Research M, EMW Publishing, Cambridge, Massachusetts, USA. – 2016. – Vol. 51. – P. 157 – 163. (Scopus)

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

24. Waveguide T-junctions with Resonant Coupling between Sections of Different Dimensions/ **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, Yu. M. Penkin // International Journal of Microwave and Wireless Technologies, Cambridge University Press and the European Microwave Association. – 2017. – Vol. 9 (5). – P. 1059–1065. (Scopus)

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, отримання розрахункових формул, аналіз та узагальнення результатів розрахунків.

25. Analytical Solution of Impedance Synthesis Problem for a 2D Array of Thin Vibrators / Yu. M. Penkin, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, **S. L. Berdnik** / Electromagnetic waves: Progress In Electromagnetics Research M, EMW Publishing, Cambridge, Massachusetts, USA. – 2018. – Vol. 65. – P. 43–49. (Scopus)

Внесок здобувача: розв'язок задачі імпедансного синтезу для вібраторної решітки, отримання розрахункових формул для імпедансів вібраторів, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз отриманих результатів.

26. Impedance Synthesis of Plane Diffraction Vibrator Arrays / Yu. M. Penkin, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, **S. L. Berdnik**, S. V. Pshenichnaya // Progress In Electromagnetics Research M. – 2020. – Vol. 89. – P. 31–41. (Scopus)

Внесок здобувача: розв'язок задачі імпедансного синтезу для дифракційних решіток, отримання розрахункових формул для імпедансів, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз отриманих результатів.

27. Analysis of Resonant Characteristics of E- and H-Plane Waveguide Junctions with Local Dielectric Inclusions / Y. M. Penkin, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, **S. L. Berdnik**, N. K. Blinova // Progress In Electromagnetics Research Letters. – 2020. – Vol. 91. – P. 17–24. (Scopus)

Внесок здобувача: формулювання загальної резонансної умови для хвилевідних зчленувань з діелектричною вставкою в області щілини зв'язку, проведення комп'ютерного моделювання.

28. Yagi-Uda Combined Radiating Structures of Centimeter and Millimeter Wave Bands / **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, Y. M. Penkin, and O. M. Dumin // Progress In Electromagnetics Research M. – 2020. – Vol. 93. – P. 89–97. (Scopus)

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

29. Slotted spherical antenna with a multi-element diaphragm in the waveguide / **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, V. I. Kijko, M. V. Nesterenko, Yu. M. Penkin // Electromagnetic waves: Progress In Electromagnetics Research M. – 2020. – Vol. 95. – P. 1–12. (Scopus)

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

30. Waveguide Radiation of The Combined Vibrator-Slot Structures / **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, Yu. M. Penkin // Progress In Electromagnetics Research B. – 2020. – Vol. 87. – P. 151–170. (Scopus)

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, отримання розрахункових формул, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

31. Щелевой излучатель в торце прямоугольного волновода с двухщелевой резонансной диафрагмой / **С. Л. Бердник**, В. А. Катрич, В. И. Кийко, М. В. Нестеренко // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии : 21-я Международная Крымская конференция, 12-16 сент. 2011 г., Севастополь, Крым, Украина: материалы конференции. – Севастополь, 2011. – С. 565–566.
Внесок здобувача: участь у постановці та розв'язанні задачі, проведенні розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.
32. Многомодовое возбуждение волноводно-щелевого излучателя вытекающей волны / **С. Л. Бердник**, В. А. Катрич, М. В. Нестеренко, С. В. Пшеничная // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: 22-я Международная Крымская конференция, 10-14 сент. 2012 г., Севастополь, Крым, Украина: материалы конференции. – Севастополь, 2012. – С. 483–484.
Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.
33. Electromagnetic waves excitation by vibrator-slot structure in rectangular waveguide / **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, D. Y. Penkin, S. V. Pshenichnaya // 6-th International Conference Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 17-21 Sept. 2012: proceedings. – Sevastopol (Ukraine). – 2012. – P. 195–197.
Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.
34. System of impedance vibrators in free space / **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko and V. I. Kiyko // XVII-th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, Sept. 24-27, 2012: proceedings. – Tbilisi (Georgia). – 2012. – P. 53–56.
Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.
35. Возбуждение электромагнитных полей многоэлементной вибраторно-щелевой структурой в прямоугольном волноводе / Д. Ю. Пенкин, **С. Л. Бердник**, В. А. Катрич, М. В. Нестеренко, В. И. Кийко // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии : 23-я Международная Крымская конференция, 8-14 сент. 2013 г., Севастополь, Крым, Украина: материалы конференции. – Севастополь, 2013. – С. 708–709.
Внесок здобувача: участь у постановці та розв'язанні задачі, проведенні розрахунків, побудові й аналізі графічних матеріалів.
36. Резонансная щелевая сферическая антенна / **С. Л. Бердник**, Ю. М. Пенкин, В. А. Катрич, М. В. Нестеренко, С. В. Пшеничная // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии : 23-я Международная Крымская конференция, 8-14 сент. 2013 г., Севастополь, Крым, Украина: материалы конференции. – Севастополь, 2013. – С. 610–611.
Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.
37. Radiation fields of radial impedance monopole mounted on a perfectly conducting sphere / D. Yu. Penkin, V. A. Katrich, V. M. Dakhov, M. V. Nesterenko,

S. L. Berdnik // IX International Conference on Antenna Theory and Techniques, September 16-20, 2013, Odessa, Ukraine: proceedings. – Odessa. – 2013. – P.123-125.

Внесок здобувача: участь у постановці та розв'язанні задачі, проведенні розрахунків, аналізі та узагальненні отриманих результатів.

38. Electrodynamic characteristics of a three-element vibrator-slot structure in a rectangular waveguide / **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko and S. V. Pshenichnaya // XVIII-th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, Sept. 23-26, 2013: proceedings. – Lviv (Ukraine). – 2013. – P. – 45–48.

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

39. Spherical antenna excited by a slot in an impedance end-wall of a rectangular waveguide // **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko and Yu. M. Penkin // XVIII-th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, Sept. 23-26, 2013: proceedings. – Lviv (Ukraine). – 2013. – P. – 111–114.

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

40. Сферическая антенна, возбуждаемая щелью в импедансном торце с потерями прямоугольного волновода / **С. Л. Бердник**, Ю. М. Пенкин, В. А. Катрич, М. В. Нестеренко, Н. К. Блинова // СВЧ техника и телекоммуникационные технологии: 24-я Международная Крымская конференция, 7-13 сент. 2014 г., Севастополь, Крым, Украина: материалы конференции. – Севастополь, 2014. – С. 491–492.

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

41. Radiation fields of the spherical slot antenna in a material medium / **S. L. Berdnik**, V. S. Vasylovskiy, M. V. Nesterenko and Yu. M. Penkin // X Anniversary International Conference on Antenna Theory and Techniques ICATT'2015, April 21-24, 2015, Kharkiv, Ukraine : proceedings. – Kharkiv. – 2015. – P. 282–284.

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

42. Waveguide E-plane T-junction with Resonance Coupling between Shoulders / **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko and Yu. M. Penkin // X Anniversary International Conference on Antenna Theory and Techniques ICATT'2015, April 21-24, 2015, Kharkiv, Ukraine : proceedings. – Kharkiv. – 2015. – P. 306–308.

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

43. Radiation Fields of Radial Monopole Array Mounted on a Perfectly Conducting Sphere / V. M. Dakhov, V. A. Katrich, **S. L. Berdnik**, M. V. Nesterenko, D. Yu. Penkin // 2015 XX-th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED-2015), Sept. 21-24, 2015: proceedings. – Lviv (Ukraine). – 2015. – P. – 66–70.

Внесок здобувача: участь у постановці та розв'язанні задачі, проведенні

комп'ютерного моделювання, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

44. Clavin Element with Impedance Monopoles / **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, Yu. M. Penkin, S. V. Pshenichnaya // 2015 XX-th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED-2015), Sept. 21-24, 2015: proceedings.– Lviv (Ukraine). – 2015. – P. – 61–65.

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

45. Spherical Antenna with a Clavin Radiator / **S. L. Berdnik**, N. K. Blinova, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko and Yu. M. Penkin // 2015 XX-th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED-2015), Sept. 21-24, 2015: proceedings.– Lviv (Ukraine). – 2015. – P. – 75–77.

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

46. Waveguide Junction with Controllable Power Division / Yu. M. Penkin, **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich and M. V. Nesterenko // 9-th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW-2016), June 21–24, 2016: Proc. – Kharkiv, 2016. – P. 1–4.

Внесок здобувача: участь у постановці та розв'язанні задачі, проведенні розрахунків, аналіз отриманих результатів.

47. Yagi-Uda Antennas with Impedance Wires / **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, Yu. M. Penkin, and S. V. Pshenichnaya // 16-th Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-2016), July 5–7, 2016: Proc. – Lviv, 2016. – P. 403–406.

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

48. E-plane T-junctions of Rectangular Waveguides with Vibrator-Slot Coupling between Arms of Different Dimensions / **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, Yu. M. Penkin // 2016 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 5-11 September, 2016 – Odessa, Ukraine: Proc. – Odessa, 2016. – P. 68–72.

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

49. Energy Characteristics of a T-Shaped Waveguide Junction with a Dielectric Insert / Yu. M. Penkin, **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, S. V. Pshenichnaya // 2016 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 5-11 September, 2016, Odessa, Ukraine: Proc. – Odessa, 2016. – P. 73–76.

Внесок здобувача: участь у постановці та розв'язанні задачі, проведенні розрахунків, аналіз отриманих результатів.

50. Influence of a dielectric insert on energy characteristics of a cruciform waveguide junction / Yu. M. Penkin, **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich and M. V. Nesterenko // XXIth International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of

Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), Sept. 26–29, 2016. – Tbilisi, Georgia: Proc. – Tbilisi, 2016. – P. 42–45.

Внесок здобувача: участь у постановці та розв'язанні задачі, проведенні розрахунків, аналіз отриманих результатів.

51. Radiation Fields of a Radial Dipole Located on a Metal Sphere Coated by a Layer of Metamaterial / Yu. M. Penkin, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, **S. L. Berdnik**, S. V. Pshenichnaya / 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), 24-27 May 2017, Kyiv, Ukraine: Proc. – 2017. – P. 92–95.

Внесок здобувача: участь у постановці та розв'язанні задачі, отримання розрахункових формул, аналіз та узагальнення результатів.

52. Radiation Field of a Dipole Placed at Impedance Sphere / Yu. M. Penkin, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, **S. L. Berdnik**, N. K. Blinova // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), May 29 – June 2: proceedings. – 2017. – P. 29–32.

Внесок здобувача: участь у постановці та розв'язанні задачі, проведенні розрахунків, аналізі та узагальненні отриманих результатів.

53. T-junction of rectangular waveguides with monopole-slot coupling structure and elements coated by a metamaterial / **S. L. Berdnik**, V. A. Katrich, V. I. Kiyko, M. V. Nesterenko, Yu. M. Penkin // Proc. XXIIth Intern. Seminar on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory DIPED'2017. – Dnipro (Ukraine). – 2017. – P. 123–127.

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

54. Diffraction radiation of a slot into a space over an impedance screen / **S. L. Berdnik**, Yu. M. Penkin, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko // Proc. XXIIth Intern. Seminar on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory DIPED'2017. – Dnipro (Ukraine). – 2017. – P. 64–67.

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі дифракції, отримання виразів для провідності щілини в імпедансному екрані.

55. Combined Wide-Angle Scanning by a Two-Dimensional Dipole Array / Yu. M. Penkin, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko and **S. L. Berdnik** // 2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 4-7 September, Odessa, Ukraine: Proc. – Odessa, 2018. – P. 300–303.

Внесок здобувача: участь у постановці та розв'язанні задачі, проведення розрахунків, аналіз отриманих результатів.

56. Dual-symmetric of integral equations for antenna currents / Yu. M. Penkin, V. A. Katrich, M. V. Nesterenko, **S. L. Berdnik** // Proc. XXIIIth Intern. Seminar on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory DIPED'2018. – Tbilisi (Georgia). – 2018. – P.55–59.

Внесок здобувача: участь у постановці та розв'язанні задачі, визначення ефективного наведеного імпедансу магнітного типу.

57. General Resonance Condition for Waveguide Junctions with Natural Dielectric Inserts / **S. Berdnik**, Yu. Penkin, V. Katrich, M. Nesterenko // Proc. XXIVth Intern. Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic

Wave Theory DIPED'2019, September 12-14, 2019, Lviv, Ukraine. – 2019. – P. 103–107.

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

58. Impedance synthesis of flat slot antenna arrays / Yu. Penkin, V. Katrich, M. Nesterenko, **S. Berdник** // Proceedings of the 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week. Kharkiv, Ukraine. - 2020. – P. 89–92.

Внесок здобувача: участь у постановці та розв'язанні задачі, проведення розрахунків, аналіз отриманих результатів.

59. Dual-band combined vibrator-slot radiating structures / Yu. Penkin, V. Katrich, M. Nesterenko, **S. Berdник**, O. Dumin // Proceedings of the 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week. – Kharkiv, Ukraine. – 2020. – P. 149–153.

Внесок здобувача: участь у постановці та розв'язанні задачі, визначення розподілів електромагнітних полів, участь у проведенні розрахунків, аналіз отриманих результатів.

60. Masking effect of a dielectric inclusion in a coupling slotted cavity cut in an infinite screen / Yu. Penkin, V. Katrich, M. Nesterenko, **S. Berdник** // Proceedings of the 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week. – Kharkiv, Ukraine. – 2020. – P. 672–675.

Внесок здобувача: участь у постановці та розв'язанні задачі, аналіз отриманих результатів.

61. Natural regularization of the kernels of integral equations for currents on impedance surfaces / Yu. Penkin, V. Katrich, M. Nesterenko, **S. Berdник** // Proceedings of the XXV th International Seminar on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory. – Tbilisi, Georgia. – 2020. – P. 87–91.

Внесок здобувача: участь у постановці задачі, аналіз коректності задачі дифракції на вузькій лінійній щілині, прорізаний у двосторонній імпедансній площині.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

62. Возбуждение электромагнитных полей продольной щелью в широкой стенке прямоугольного волновода в присутствии пассивных импедансных вибраторов вне волновода / **С. Л. Бердник**, В. А. Катрич, М. В. Нестеренко, Ю. М. Пенкин // Радиофизика и радиоастрономия. –2016. – Т.21, №3. – С. 198–215.

Внесок здобувача: постановка та розв'язання задачі, проведення комп'ютерних розрахунків, аналіз та узагальнення отриманих результатів.

63. Управление энергетическими характеристиками волноводных сочленений с диэлектрическим включением / Ю. М. Пенкин, **С. Л. Бердник**, В. А. Катрич, М. В. Нестеренко, С. В. Пшеничная // Прикладная радиоэлектроника. – 2017. – Том 16, № 1,2. – С. 51–60.

Внесок здобувача: участь у постановці та розв'язанні задач, проведення розрахунків, аналіз отриманих результатів.

64. Пат. 120298, Україна, МПК H01Q 7/08 (2006.01) / Магнітний шлейф-вібратор // О. І. Карпов, В. О. Катрич, **С. Л. Бердник**, М. В. Нестеренко, Є. О. Антоненко; власник ХНУ імені В.Н. Каразіна. – № а201710295; заявл. 17.10.2017; опублік. 11.11.2019, Бюл. № 21/2019.

Внесок здобувача: пошук та аналіз аналогів, складання формули винаходу.

65. Пат. 119283, Україна, ПК H01Q 1/48 (2006.01), H01Q 7/08(2006.01), H01Q 9/26 (2006.01) / Антена широкосмугова портативна // О. І. Карпов, В. О. Катрич, **С.Л. Бердник**, М. В. Нестеренко, Є. О. Антоненко; власник ХНУ імені В.Н. Каразіна. – № а201710066; заявл. 17.10.2017; опублік. 27.05.2019, Бюл. № 10/2019.

Внесок здобувача: пошук та аналіз аналогів, складання формули винаходу.

АНОТАЦІЯ

Бердник С.Л. Формування електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними випромінюючими структурами в електродинамічних об'ємах з імпедансними границями. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика (Фізико-математичні науки). – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертацію присвячено розвитку теорії комбінованих вібраторно-щілинних випромінюючих структур, що містять лінійні імпедансні вібраторні і щілинні випромінювачі в електродинамічних об'ємах з імпедансними границями, включаючи багатоелементні системи.

Розвинуто числово-аналітичні методи розв'язання інтегро-диференціальних рівнянь для електричних і магнітних струмів у вібраторних і щілинних елементах комбінованих структур, побудовано високоефективні за точністю й швидкістю розрахунків математичні моделі, методи й алгоритми. Запропоновано новий метод імпедансного синтезу антенних решіток. Виявлено нові фізичні закономірності у формуванні електромагнітного поля вібраторно-щілинними структурами у хвилевідних трактах, на сферичних поверхнях, хвилевідних зчленуваннях з імпедансними поверхнями (включаючи покриття з метаматеріалу) і діелектричними вставками, багаточастотними випромінювачами. Визначено умови реалізації випромінювачів з необхідними електродинамічними характеристиками. Отримані результати є основою для розробки і створення нової елементної бази радіоелектронних засобів метрового і мікрохвильового діапазонів, яка дозволяє значно розширити їх функціональні можливості, сприятиме вирішенню проблем забезпечення електромагнітної сумісності, завадозахищеності, селекції сигналів, мініатюризації.

Ключові слова: електромагнітне поле, комбінована вібраторно-щілинна структура, тонкий імпедансний вібратор, вузька щілина, поверхневий імпеданс, інтегральне рівняння, узагальнений метод наведених електро-магніторушійних сил, метод усереднення, хвилевідне зчленування, сферичний випромінювач, метод імпедансного синтезу.

ABSTRACT

Berdnik S.L. Formation of electromagnetic fields by combined vibrator-slot radiating structures in electrodynamic volumes with impedance boundaries. – Manuscript of qualifying scientific work.

Thesis for a Doctor degree in physical and mathematical sciences: Speciality 01.04.03 – radiophysics (Physical and mathematical sciences). – V.N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to the development of the theory of combined vibrator-slot radiating structures, creation of physically correct mathematical models, and improvement of numerical-analytical methods for solving corresponding boundary value problems of electrodynamics, which allow a theoretical analysis of physical properties of excitation fields (the radiation, scattering) and functional characteristics of combined vibrator-slot structures containing impedance vibrators and slot radiators, as well as their multi-element systems located in different electrodynamic volumes with impedance boundaries (including coating of metamaterial) and filled with material.

New concepts of effective induced impedances of electric and magnetic types are introduced into electrodynamic analysis of electrically thin radiators, which allowed to formulate of current integral equations for radiators of electric and magnetic types in dual-symmetric form. The problem of constructive realization of magnetic type impedance is solved.

For the first time, the problems of excitation and radiation of electromagnetic fields by transverse and longitudinal slots in the wide wall of a rectangular waveguide, inside and outside of which there are vibrators (monopoles) with variable surface impedance have been solved by taking into account the full interaction between all elements of the vibrator-slot structures. The conditions for the realization of the radiation coefficient of the structures close to unity and the conditions for controlling the frequency characteristics are determined. The optimal parameters of a Klevin-type radiator with impedance vibrators when radiating into half-space over an infinite plane for the formation of fields with given characteristics are determined.

For the first time by the generalized method of induced magnetomotive forces, the distributions of currents in a multi-element combined slot-vibrator array with impedance radiators are determined. It was found that such a system allows one to obtain a radiation pattern similar to the pattern of the Yagi-Uda array while ensuring good matching with the waveguide path.

The problems of excitation of electromagnetic fields in waveguide joints (tees) with vibrator-slot structures in the area of communication, dielectric inserts and impedance surfaces were solved. The conditions for separation of the powers of the waves in a given ratio, the conditions for equal power separation between waveguide modes in the side waveguide (provided its multimode operation) and between all physical channels of power-sharing with good matching were determined. The general resonance condition for waveguide joints with a dielectric insert was formulated.

The problems of excitation and radiation of electromagnetic waves by a narrow resonant slot cut in an ideally conducting sphere of the arbitrary radius when a slot is

excited by a semifinite rectangular waveguide with impedance end wall; by a rectangular waveguide with single- and double-slot through resonator. It is determined that the placement of the passage resonator in the waveguide path significantly increases the quality factor of the system, while the resonance curve has a large steepness, and its shape is close to rectangular. The presence of the second slot in the diaphragm leads to a narrowing of the bandwidth by half the radiation power to 50%.

For the first time, the problem of forming electromagnetic fields by a structure consisting of a resonant slot in an ideally conducting sphere and two radial impedance vibrators was solved. The conditions for the implementation of a Klevin-type radiator on a sphere were determined.

For the first time, a multifrequency radiator has been implemented based on an electrically long slot in a narrow wall of finite thickness of a multimode rectangular waveguide when the waveguide is excited by higher types of waves at different frequencies.

A new method of impedance synthesis of the radiation pattern of antenna arrays with impedance vibrator and slot elements is proposed. For the first time, analytical formulas are obtained for the real and imaginary parts of the surface impedances of the array elements, which ensure the formation of the radiation pattern of the array with a maximum in the given direction.

The correspondence of the constructed models to real physical processes is confirmed by comparison with the experimental data known from the literature and the original results of experimental studies for vibrator, slot and combined structures.

The obtained results are the basis for the development and creation of a new element base of radio-electronic means of meter and microwave ranges, which allows to significantly expand their functionality, will contribute to solving the problems of ensuring electromagnetic compatibility, noise immunity, signal selection, miniaturization.

Keywords: electromagnetic field, combined vibrator-slot structure, thin impedance vibrator, narrow slot, surface impedance, integral equation, generalized method of induced electro-magnetomotive forces, averaging method, waveguide junction, spherical radiator, method of impedance synthesis.