

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Бердника Сергія Леонідовича **“Формування електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними випромінюючими структурами в електродинамічних об’ємах з імпедансними границями”**, подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Розширення елементної бази радіоелектронних пристроїв метрового, сантиметрового та міліметрового діапазонів довжин хвиль можливе при застосуванні випромінювальних структур, сформованих вібраторно-щілинними елементами, розташованими в електродинамічних об’ємах з імпедансними границями. Використання таких комбінованих магнітно-електричних випромінювачів відкривають нові можливості для формування просторових розподілів полів із заданими параметрами як у ближній, так і дальній зонах випромінювання, що в значній мірі сприяє 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 технічної фізики.

Значна кількість наукових праць, що стосуються дослідження тонких вібраторних і щілинних випромінювачів дозволила за останні десятиліття сформулювати сучасну теорію таких випромінювачів, яка об’єднує асимптотичні методи, числово-аналітичні підходи, а також прямі числові методи електродинамічного аналізу. Розвиток сучасної техніки антенних систем і антенно-фідерних трактів, які забезпечують багатофункціональність, володіють мінімальними масогабаритними параметрами, забезпечують електромагнітну сумісність і використання композитних та метаматеріалів вимагає подальшого розвитку теорії таких систем. Необхідно відзначити, що введення до розгляду імпедансних структур, дозволяє у значній мірі вирішити проблему мініатюризації радіоелектронних пристроїв. Проте, в рамках відомих числово-аналітичних методів, ряд перспективних щодо практичного використання комбінованих вібраторно-щілинних структур, розміщених у хвилевідних трактах і, які містять імпедансні вібратори з нерегулярними геометричними й електрофізичними параметрами, не розглядались. Не розглядався в рамках числово-аналітичних методів і широкий клас вібраторно-щілинних випромінювачів, розташованих на сферичних поверхнях з імпедансними поверхнями, а також у з’єднанні хвилеводів з вібраторно-щілинними структурами. Тому подальший розвиток теорії електродинамічного аналізу складних випромінюючих систем, які формуються комбінованими вібраторно-щілинними елементами в імпедансних об’ємах є **актуальною** проблемою. Вирішенню цієї проблеми і присвячено дисертацію Бердника С.Л.

Робота виконана на кафедрі фізичної і біомедичної електроніки та комплексних інформаційних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

відповідно до планів науково-дослідних робіт відомчої тематики в період з 2011 р. по 2021 р. Матеріали дисертації є складовими частинами 10 держбюджетних науково-дослідних робіт, які виконувалися за участю дисертанта.

Слід відзначити такі **основні нові результати**, які отримані в роботі.

Уведено до електродинамічного аналізу нові поняття електрично тонких випромінювачів, а також ефективних наведених імпедансів електричного та магнітного типів, що дозволило сформулювати струмові інтегральні рівняння для таких випромінювачів у дуально-симетричній формі та вперше розв'язати задачу імпедансного синтезу щілинних решіток.

Вперше розв'язано задачі збудження та випромінювання електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними структурами на прямокутному хвилеводі з імпедансними вібраторними елементами зі змінним імпедансом. Особливостями розв'язання цих задач є використання в методі наведених ЕМРС розв'язків, попередньо отриманих асимптотичним методом усереднення, та врахування змінного вздовж вібраторів поверхневого імпедансу. Це дозволило визначити умови реалізації коефіцієнта випромінювання структури, близького до одиниці та керування її частотними характеристиками. Крім того, визначено оптимальні параметри випромінювача типу Клевіна з імпедансними вібраторами над нескінченною площиною для формування полів із заданими характеристиками. Отримано рівняння параметричного типу для знаходження реактивного імпедансу монополя всередині хвилеводу у випадку розгляду структури з поперечною щілиною, при якому забезпечується резонансний режим випромінювання.

Автором розв'язано задачі збудження електромагнітних полів у хвилевідних з'єднаннях з вібраторно-щілинними структурами в області зв'язку прямокутних хвилеводів імпедансними поверхнями й діелектричними вставками. Визначено умови підвищення коефіцієнтів передачі за потужністю в бічний хвилевід, а також умови поділу потужностей хвиль у заданому співвідношенні. Сформульовано загальну резонансну умову для хвилевідних з'єднань з діелектричною вставкою в області щілини зв'язку та встановлено точність визначення резонансної довжини хвилі.

Вперше розв'язано задачі збудження та випромінювання електромагнітних хвиль щілинними та комбінованими вібраторно-щілинними випромінювачами на сферичній поверхні довільного радіуса при збудженні щілини напівнескінченим прямокутним хвилеводом з імпедансним торцем та щілинним прохідним резонатором. Виявлено, що зміна значень матеріальних параметрів магнітодіелектрика, з якого виготовлено імпедансне покриття дозволяє перебудову довжини хвилі резонансного випромінювання при збереженні його вхідного узгодження. Визначено, що розміщення у хвилевідному тракті прохідного резонатора суттєво підвищує добротність системи, а наявність у діафрагмі щілин приводить до звуження смуги пропускання. Визначено також умови реалізації випромінювача типу Клевіна на сфері. Узагальненим методом наведених ЕМРС визначено розподіли струмів у багатoelementній комбінованій щілинно-вібраторній решітці з

імпедансними випромінювачами. Виявлено, що така система дозволяє отримати діаграму спрямованості (ДС), подібну до ДС вібраторної антени при забезпеченні доброго узгодження з хвилевідним трактом.

Вперше запропоновано та реалізовано багаточастотний випромінювач на основі електрично довгої щілини, заповненої діелектриком у вузькій стінці скінченної товщини багатомодового прямокутного хвилеводу, у якому напрями максимального випромінювання для трьох частот співпадають. Запропоновано новий метод імпедансного синтезу ДС антенних решіток з імпедансними вібраторними елементами, отримано аналітичні формули для дійсної і уявної частин поверхневих імпедансів вібраторних елементів дифракційних решіток, які забезпечують формування максимуму ДС у заданому напрямі.

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

Розвинені автором коректні числово-аналітичні методи та побудовані моделі випромінюючих структур дозволили провести числові дослідження їх електродинамічних характеристик та виявити ряд *нових фізичних закономірностей* формування електромагнітних полів такими структурами.

У випадку поперечної щілини у широкій стінці прямокутного хвилеводу, в середині якого розташовано два імпедансних монополі, показано, що:

- розташування монополів безпосередньо під щілиною практично не впливає на коефіцієнт випромінювання структури, в той же час вібратори з різними значеннями поверхневого імпедансу дозволяють оптимізувати вхідне узгодження випромінювача або отримати високودобротні резонанси відбиття, що, у свою чергу, дозволяє 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 $z_0 = \lambda_g / 2$; показано, що таке зміщення монополя у площині поперечного перерізу хвилеводу зумовлює зміну ширини смуги частотної залежності коефіцієнта випромінювання.

Для вібраторно-щілинних структур типу Клевіна показано, що оптимальна ДС може бути реалізована тільки при малому коефіцієнті випромінювання, оскільки компенсація поля випромінювання щілини полями вібраторів одночасно супроводжується придушенням власного поля в щілині; виявлено, що підвищення коефіцієнта випромінювання структури з повздовжньою щілиною при збереженні подібних ДС в E - і H - площинах можна досягнути збільшенням довжини щілини на 15-20 % у порівнянні з її резонансною довжиною.

У результаті числового моделювання збудження електромагнітних полів у хвильовідних Е-площинних Т-подібних з'єднань автором дисертації визначено умови збільшення коефіцієнта передачі за потужністю в бічний хвильовід на резонансній довжині хвилі щілини й монополя; виявлено, що зсув монополя в площині поперечного перерізу хвильоводу приводить до розширення ширини смуги передавальної характеристики; визначено умови поділу потужностей хвиль у заданому співвідношенні та умови рівного поділу падаючої потужності між модами; виявлено, що покриття торця бічного хвильовідного плеча метаматеріалом може забезпечувати трьохрезонансний режим передачі потужності з основного хвильоводу в бічний.

Для задач збудження електромагнітних полів у хвильовідних з'єднаннях з діелектричними вставками й імпедансними поверхнями встановлена можливість підбором електричних параметрів хвильовідних пристроїв забезпечити необхідний рівень передачі потужності з основного хвильоводу в бічний; показано, що розміщення у хвильовідному тракті прохідного резонатора суттєво підвищує добротність системи, а наявність у діафрагмі більше як однієї щілини приводить до звуження смуги пропускання за рівнем половинної потужності випромінювання до 50 % та повного відбиття падаючої на діафрагму хвилі типу H_{10} .

В задачі 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.

При розв'язанні задачі випромінювання електромагнітних хвиль багатoelementною комбінованою щілинно-вібраторною решіткою з імпедансними елементами, розміщеними над щілиною виявлено можливість отримати діаграму спрямованості, подібну до ДС директорної антени (решітки Ягі-Уда).

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

Метод імпедансного синтезу ДС, розроблений для вібраторних структур, за допомогою принципу дуальності автором узагальнено на випадок щілинних двовимірних плоских решіток, у яких щілини збуджуються в центральній частині своїх апертур дельта-генераторами напруги.

Вірогідність і обґрунтованість наукових результатів дисертаційної роботи не викликають сумніву, тому що вони отримані з використанням фундаментальних принципів електродинаміки, із застосуванням широко апробованих на практиці математичних

методів та достатнього обсягу експериментальних досліджень. Основні теоретичні результати у граничних випадках збігаються з відомими.

Практичне значення отриманих 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 самоузгодженій постановці, що забезпечує достовірність одержаних результатів, розкриває потенційні можливості формулювання 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 багатоеlementних систем, які дозволяють провести багатопараметричний аналіз фізичних властивостей електромагнітних полів у таких системах і дати 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 їх функціональні можливості. Вони перспективні для застосування при вирішенні проблеми забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронних пристроїв, завадозахищеності, селекції сигналів, мініатюризації, 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 багатофункціональних радіоелектронних систем», відзначеного Державною премією України в галузі науки і техніки 2016 року.

Матеріали та наукові результати всіх розділів дисертації всебічно висвітлені в публікаціях у фахових журналах та **апробовані** на багатьох міжнародних конференціях, добре відомі науковій світовій громадськості та спеціалістам. Матеріали дисертації викладено у 5 монографіях, 3 з яких – у видавництві “Springer”, 23 статтях (17 з яких входять

до наукометричної бази SCOPUS), 31 публікації в матеріалах міжнародних наукових конференцій та додатково відображені в 2 статтях та 2 патентах України.

Дисертація є **цілісною завершеною роботою**, яка об'єднана єдиною метою – вирішення проблеми щодо повного уявлення про фізичні процеси збудження, розсіювання та випромінювання електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними структурами в електродинамічних об'ємах з імпедансними границями.

Зміст дисертації відповідає паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика. Дисертація й автореферат оформлені відповідно до вимог Атестаційної колегії Міністерства освіти й науки України. Автореферат достатньо повно відображає зміст дисертаційної роботи, всі її основні ідеї та висновки, ступінь їх новизни.

Результати й положення **кандидатської дисертації** Бердника С.Л. «Випромінювання електромагнітних хвиль щілинами в одномодовому та багатомодовому прямокутних хвилеводах», яка присвячена аналізу особливостей випромінювання електромагнітних хвиль одиночними щілинами і їх системами в прямокутному хвилеводі, у його докторській дисертації не використовувалися.

У цілому, дисертація має високий науковий і професійний рівень, однак слід зазначити деякі її **недоліки**:

1. У дисертаційній роботі розробляються підходи і методи для електродинамічного аналізу тонких вібраторів та щілин. Основною умовою їх застосування є малість відношення радіуса вібратора (ширини щілини) до його довжини. Тому виникає питання, за якого мінімального значення цього співвідношення справедливі підходи автора. Думаю, що цю оцінку можна було б дати, порівнявши результати з даними для товстих скінченних циліндрів або конусів. Відповідь на це питання могла б розширити межі застосування моделей і методів, що використовуються в дисертації.

2. Не зовсім ясно, як практично реалізується вібраторно-щілинні структури типу Ягі-Уда (с. 270, рис. 5.5).

3. Наскільки коректним є використання характеристик метаматеріалу LR-5I, які отримано в рамках припущення нескінченної площини, для поверхонь скінченного розміру (сс. 194-195)?

4. Думаю також, що обсяг дисертаційної роботи є трохи зavelиким, має місце зайва деталізація. Оскільки результати автора є широко опубліковані в доступних вітчизняних і зарубіжних періодичних виданнях і монографіях, то скорочення обсягу роботи можна було б досягти скоротивши, наприклад, графічний матеріал.

Однак, зазначені недоліки і зауваження практично не впливають на загальну високу оцінку наукового рівня дисертаційної роботи.

За своєю актуальністю, ступенем обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірністю та новизною дисертаційна робота Бердника Сергія Леонідовича «Формування електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними випромінюючими структурами в електродинамічних об'ємах з імпедансними границями»

ми» відповідає вимогам Атестаційної колегії Міністерства освіти і науки України щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук, а її автор, Бердник С.Л., заслуговує присудження вченого ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент, провідний науковий співробітник Відділу теорії хвильових процесів та оптичних систем діагностики ФМІ НАН України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, доктор фізико-математичних наук, професор



Д. Куриляк



Візрук офершань 29 квітня 2021 р
Учений секретар спецради

