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.

Актуальність обраної теми дослідження та її зв'язок з науковими програмами, темами. Вібраторні та щілинні випромінювачі або отвори зв'язку хвилеводів є базовими елементами мікрохвильової та антенної техніки. Незважаючи на більш ніж вікову історію досліджень, що стосуються вивчення особливостей електромагнітного випромінювання такими структурами і велику кількість отриманих теоретичних і експериментальних результатів інтерес до цієї проблеми постійно зростає. Пов'язано це із двома головними обставинами. По-перше, сучасні радіотехнічні системи, що працюють у НВЧ і КВЧ діапазонах, у якості своїх функціональних елементів містять різноманітні щілинні та вібраторні структури, які входять до складу фідерного тракту або виконують функції антенних пристроїв. Зокрема, хвилевідно-щілинні антени в цих частотних діапазонах у деяких випадках виявляються поза конкуренцією з огляду на їх функціональні параметри і технологічність виготовлення. Різні модифікації таких антен, зокрема, в комбінації з вібраторними елементами дозволяють реалізувати ефективне узгодження з лінією передачі, діаграму спрямованості будь-якої необхідної форми з мінімальним рівнем бічних пелюсток, широкосмуговість або при необхідності частотне сканування, задану поляризацію випромінювання і т.д.

По-друге, доводиться констатувати, що дотепер немає єдиного ефективного методу для строгого теоретичного опису електромагнітного випромінювання комбінованими вібраторно-щілинними структурами, що містять імпедансні вібраторні та щілинні випромінювачі, розташовані у різних електродинамічних областях з імпедансними границями при всьому різноманітті параметрів, що становлять інтерес для практики. Основна складність при цьому полягає в тому, що задача

про випромінювання повинна розглядатися в самоузгодженій постановці. Граничні умови, яким повинні задовольняти поля на границях областей і отворах – щілинах, особливо при великій кількості елементів, приводять до досить складних інтегральних або функціональних рівнянь. Ці рівняння вдається розв'язувати або чисельними методами, або будувати наближені, придатні лише для обмеженої області значень параметрів, аналітичні розв'язки.

Значні успіхи в розвитку деяких аспектів теорії й в експериментальних дослідженнях хвилевідно-щілинних та вібраторних випромінювачів були досягнуті в останні десятиліття в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна. Добре відомі роботи Ю. В. Шубаріна, М. М. Горобця, Л. П. Яцук, В. О. Катрича, М.В. Нестеренка і ін. До цієї ж наукової школи належить і С. Л. Бердник, дисертаційна робота якого присвячена дослідженню особливостей формування електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними випромінюючими структурами в електродинамічних областях з імпедансними границями.

Тема роботи безумовно актуальна, а отримані результати мають практичне значення для створення нових або істотного покращення робочих характеристик діючих радіотехнічних пристроїв.

Про актуальність і практичну значимість тематики дисертації також свідчить те, що матеріали дисертації є складовими частинами 10 держбюджетних науково-дослідних робіт (НДР) за 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”, які виконано у Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна в період з 2011 р. до 2021 р. Автор був науковим керівником 3 НДР і відповідальним виконавцем 3 НДР.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, та їх **обгрунтованість** не викликає сумнівів. Для вирішення задач збудження полів електричними та еквівалентними магнітними струмами застосовано широко апробовані на практиці математичні методи. Роботі притаманні коректність у постановці задач, математична строгість у їх розв’язані,

фізичне обґрунтування граничних умов і використання відомих строгих та наближених методів теоретичної та обчислювальної електродинаміки. Важливо, що більшість отриманих у роботі теоретичних результатів підтверджено результатами експериментальних досліджень або порівнянням з результатами інших авторів.

Наукова новизна результатів дослідження. У роботі вперше отримано розв'язки низки граничних задач електродинаміки та створено комплекс ефективних математичних засобів для розв'язання задач випромінювання і розсіювання електромагнітних хвиль комбінованими вібраторно-щілинними структурами, які містять імпедансні вібраторні (у загальному випадку з нерегулярними геометричними й електрофізичними параметрами) та щілинні випромінювачі, розташовані у різних електродинамічних областях з імпедансними границями (включаючи покриття з метаматеріалу) та заповнених матеріальним середовищем. Побудовано фізично коректні математичні моделі, розроблено високоефективні за точністю й швидкістю методи і алгоритми розрахунку й аналізу електродинамічних характеристик 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.

Для моделювання кожного типу випромінювача чи отвору зв'язку електродинамічних об'ємів було використано свій математичний апарат. Застосовувались аналітичні, чисельно-аналітичні методи, метод Гальоркіна для розв'язання інтегро-диференціального рівняння відносно розподілу дотичної складової електричного поля (еквівалентного магнітного струму) на апертурі електрично довгого щілинного випромінювача, методи наведених електрорушійних сил (ЕРС), магніторушійних сил (МРС) і електромагніторушійних сил (ЕМРС) з використанням асимптотичних виразів для електричного та магнітного струмів, отриманих методом усереднення при розв'язанні задач щодо вібраторних, щілинних та комбінованих вібраторно-

щілинних структур, техніка тензорних функцій Гріна в задачах збудження електромагнітних хвиль у різних електродинамічних областях; метод власних хвиль.

Особливо слід відзначити такі **нові результати**, які отримано в роботі.

Уперше розв'язано задачі збудження та випромінювання електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними структурами на прямокутному хвилеводі з імпедансними вібраторними елементами (зі змінним уздовж них поверхневим імпедансом) усередині та зовні хвилеводу з урахуванням повної взаємодії між усіма елементами 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. Визначено умови реалізації коефіцієнта випромінювання структур, близького до одиниці, покращення вхідного узгодження, керування шириною смуги пропускання частотних характеристик. Визначено оптимальні параметри випромінювача типу Клевіна з імпедансними вібраторами при випромінюванні у півпростір над нескінченною площиною для формування ДС із однаковою шириною в *E*- і *H*-площинах, ДС із найбільш низьким рівнем бічного випромінювання або 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 менше ніж 0.1, збільшити який дозволяє розміщення додаткового настроювального імпедансного монополя всередині хвилеводу. Отримано рівняння параметричного типу щодо визначення реактивного імпедансу настроювального монополя 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, імпедансними поверхнями (включаючи покриття з метаматеріалу) й діелектричними вставками. 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 хвилеводу, 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. 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 випромінюваннння електромагнітних хвиль щілинними та комбінованими вібраторно-щілинними випромінювачами на сферичній поверхні довільного радіуса при збудженні щілини напівнескінченним прямокутним хвилеводом з імпедансним торцем та прямокутним хвилеводом з одно- і двощілинним прохідним резонатором. Виявлено, що зміна значень матеріальних параметрів магнітодіелектрика, з якого виконано імпедансне покриття торця хвилеводу, а отже, і значень його поверхневого імпедансу дозволяє переналаштування 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 %. Визначено умови реалізації випромінювача типу Клевіна на сфері.

Уперше запропоновано випромінювач біжної хвилі на основі багатоелементної комбінованої щілинно-вібраторної решітки з імпедансними випромінювачами, що поєднує щілину, прорізану у стінці прямокутного хвилеводу та систему пасивних імпедансних вібраторів, розміщених над щілиною у вільному півпросторі. Узагальненим методом наведених електро-магніторушійних сил визначено розподіли струмів у такій щілинно-вібраторній решітці. та показано, що така система дозволяє отримати діаграму спрямованості, подібну до ДС директорної антени (решітки Ягі-Уда) при забезпеченні доброго узгодження з хвилевідним трактом.

Уперше визначено умови реалізації багаточастотного випромінювача на основі електрично довгої щілини (довжиною в десятки й сотні довжин хвиль), заповненої діелектриком, у вузькій стінці скінченної товщини багатомодового прямокутного хвилеводу при збудженні хвилеводу хвилями типу H_{m0} на різних часто-

тах. При цьому задачу з визначення розподілу поля на поверхнях щілини розв'язано узагальненим методом наведених МРС із застосуванням обмеженої кількості тригонометричних базисних функцій. Це дозволило розрахувати характеристики трьохчастотного випромінювача з довжиною в 110 довжин хвиль, що збуджується хвилями H_{10}, H_{20} і H_{30}.

Запропоновано новий метод імпедансного синтезу ДС випромінювання антенних решіток з імпедансними вібраторними елементами. Вперше отримано аналітичні формули для дійсної і уявної частин поверхневих імпедансів елементів решіток, які забезпечують формування максимуму ДС випромінювання решіток в заданому напрямку.

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

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 розсіювального вібраторного елемента.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях. Результати дисертації Бердника С.Л. опубліковані **у 5 монографіях**, три з яких – у видавництві "Springer" і дві монографії видавництва ХНУ імені В.Н. Каразіна; двох розділах монографій; **23 статтях** у фахових наукових журналах, зокрема, 6 статей у наукових фахових виданнях України і 17 статей у закордонних спеціалізованих наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; 31 публікації в матеріалах міжнародних наукових конференцій. Також наукові результати

додатково відображені в 2 статтях і **2 патентах** України. Таким чином, матеріали дисертаційної роботи достатньо повно викладені у вітчизняних та закордонних наукових виданнях і пройшли апробацію на багатьох міжнародних конференціях, добре відомі науковій світовій громадськості та спеціалістам.

Практичне значення одержаних результатів. Вимоги практики обумовлюють необхідність пошуку нових теоретичних ідей і пов'язаних з ними шляхів технічної реалізації перспективних у прикладному плані фізичних ефектів і явищ, передбачають створення базових елементів, структур і функціональних пристроїв, які мають нові, досі не досяжні технічні характеристики, розробку сучасних комп'ютерних технологій аналізу і можливої оптимізації параметрів окремих базових елементів і приймально-передавальних комплексів НВЧ та КВЧ діапазонів у цілому.

Отримані в дисертаційній роботі аналітичні результати, запропоновані автором фізичні та математичні моделі, методи та алгоритми розрахунку характеристик збудження, випромінювання та розсіяння електромагнітних хвиль вібраторними, щілинними та комбінованими вібраторно-щілинними структурами і їх багатоелементними системами в електродинамічних областях з імпедансними границями є цікавими як з наукової точки зору, так і можуть безпосередньо використовуватись при розв'язанні зазначеного кола прикладних задач. Вони можуть бути використані, перш за все, в галузі створення сучасних випромінюючих систем для радіотехнічних і радіолокаційних комплексів різного призначення і базування, пристроїв та обладнання сучасних НВЧ-технологій та систем зв'язку; при вирішенні питань забезпечення електромагнітної сумісності, завадозахищеності, селекції сигналів, створенні антен зі спеціальними вимогами до частотно-енергетичних характеристик і характеристик спрямованості та випромінювання.

Результати досліджень автора важливі не тільки для розвитку уявлень щодо фізичних властивостей відповідних структур, але й для цілеспрямованого вибору електродинамічних принципів роботи та способів технічної реалізації нових функціональних випромінюючих елементів і пристроїв із необхідними характеристиками.

Безпосередньо в роботі наведено низку прикладів використання одержаних теоретичних результатів для розрахунку характеристик різних видів вібраторно-

щілинних антенно-фідерних структур, комбінованих випромінювачів та антенних решіток (багаточастотних, багатоелементних, випромінювачів біжної та витічної хвилі, хвилевідних трійників, сферичних антен, тощо) з раніше недосяжними оптимальними та новими електродинамічними характеристиками і вперше показана можливість їх практичної реалізації.

Відображені в дисертації нові наукові результати є також важливими для подальшого розвитку та застосування в системах автоматизованого проектування антенних і антенно-фідерних пристроїв на основі хвилевідно-щілинних, вібраторних та комбінованих вібраторно-щілинних структур.

Таким чином, розв'язана в роботі фундаментальна проблема сучасної радіофізики зі збудження, розсіяння та випромінювання електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними структурами має актуальне прикладне значення щодо створення нових або суттєвого покращення робочих характеристик діючих пристроїв НВЧ та КВЧ діапазонів. Результати роботи можуть бути рекомендовані для використання в провідних наукових установах НАН України фізичного та радіофізичного напрямку (ІРЕ НАНУ, РІ НАНУ), науково-технічних та науково-технологічних установах України, у вищих навчальних закладах України (ХНУ імені В.Н. Каразіна, ХНУРЕ, ХАІ тощо) та в інших установах.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності та відповідності встановленим вимогам. Дисертація є **завершеним науковим дослідженням**, виконаним на високому науковому рівні. В ній викладено нові фізичні результати, що мають як самостійне наукове, так і прикладне значення, оскільки отримані результати сприяють вирішенню важливої наукової проблеми радіофізики яка стосується збудження, розсіяння та випромінювання електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними структурами.

Зміст дисертації відповідає паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика. Дисертація й автореферат оформлені відповідно до вимог Міністерства освіти й науки України, що висуваються до такого роду наукових робіт. Автореферат повно і правильно відображає зміст дисертаційної роботи, всі її основні ідеї та висновки, ступінь їх новизни.

Результати **кандидатської дисертації** Бердника С.Л. "Випромінювання електромагнітних хвиль щілинами в одномодовому та багатомодовому прямокутних хвилеводах" у його докторській дисертації не використовувалися.

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

1. При розгляді випромінювання із щілин у стінках прямокутного хвилеводу, зокрема, й у присутності вібраторних елементів, наприклад, у розділі 2 і розділі 5, автор припускає, що це випромінювання відбувається в півпростір над нескінченною металевою площиною. Крайові ефекти, що мають місце на зовнішніх ребрах стінок хвилеводу, у зв'язку із цим не враховуються. У низці випадків, особливо коли щілини прорізані у вузькій стінці або в торці хвилеводу, похибка розрахунку може бути, очевидно, істотною.

2. Добре відомо, що при експериментальному визначенні характеристик антенних систем існує безліч джерел похибок, які не піддаються урахуванню, пов'язаних з неточностями виготовлення макетів, паразитними відбиттями в тракті, у вільному просторі, тощо. Автор, як правило, приводить у роботі експериментальні результати (наприклад, рис. 2.9, рис. 2.18, рис. 3.12, рис. 3.17, рис. 4.4.), що не містять достовірних даних про величину похибки. Виправданням цьому може слугувати лише теоретичний акцент дисертації, у зв'язку із чим експериментальні дані мають винятково ілюстративний характер.

3. В тексті наведено залежності для плоских діаграм спрямованості (рис. 5.19), а не для об'ємних діаграми спрямованості, з тексту не зрозуміло, як обчислювався коефіцієнт спрямованої дії в цьому випадку.

Висновки по роботі в цілому. Зазначені недоліки і зауваження не є принциповими і не впливають на загальну високу оцінку наукового рівня дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота С.Л. Бердника «Формування електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними випромінюючими структурами в електродинамічних об'ємах з імпедансними границями» є завершеною працею. В роботі отримано нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності вирішують актуальну проблему сучасної радіофізики, яка стосується збудження, розсіяння та випромінювання електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними

структурами, що має актуальне прикладне значення для створення нових або суттєвого покращення робочих характеристик діючих пристроїв НВЧ та КВЧ діапазонів.

Автореферат повністю відповідає змісту дисертації.

З урахуванням актуальності, наукової новизни, практичної значущості результатів та відповідності змісту дисертації спеціальності 01.04.03–радіофізика вважаю, що дисертаційна робота С.Л. Бердника «Формування електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними випромінюючими структурами в електродинамічних об'ємах з імпедансними границями» відповідає усім вимогам, зазначеним у п. 9, п. 10, п. 12, п. 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567 (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 565 від 19.08.2015, № 1159 від 30.12.2015) щодо докторських дисертацій, а її автор, Бердник Сергій Леонідович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03–радіофізика.

Офіційний опонент,
головний науковий співробітник
Радіоастрономічного інституту НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор С. Л. Просвірнін

Підпис д. ф.-м. н.,
проф. С. Л. Просвірніна засвідчую:
Учений секретар РІ НАН України
к. ф.-м. н. Ю. В. Антоненко

УКРАЇНА
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК
Радіоастрономічний інститут
Ідентифікаційний код 02772020

Відгук одержано 26 квітня 2021 р
Учений секретар спецради