

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 теми дисертації. Створення нових і вдосконалення діючих радіоелектронних комплексів і пристроїв антенно-фідерних трактів безпосередньо пов'язані з розробкою вібраторних випромінювачів на основі різних імпедансних структур, застосуванням лінійних випромінювачів електричного й магнітного (щілинних випромінювачів і отворів зв'язку електродинамічних об'ємів) типу з нерегулярними геометричними й електрофізичними параметрами, а також комбінованих вібраторно-щілинних структур.

Їхнє масове й різнофункціональне застосування, включаючи багатoeлементні 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 в якості елементів випромінюючих структур комбінованих вібраторно-щілинних випромінювачів, зокрема, розташованих у складних електродинамічних об'ємах з імпедансними границями й таких, які містять імпедансні вібратори зі змінним поверхневим імпедансом. Використання таких комбінованих магнітно-електричних випромінювачів і їхніх багатoeлементних систем відкривають нові можливості для формування просторових розподілів полів із зазначеними параметрами в ближній і дальній зонах випромінювання, що може значною мірою сприяти розширенню функціональних властивостей радіотехнічних і радіоелектронних пристроїв, а також дозволяє забезпечити розв'язання широкого кола задач сучасної радіофізики для багатьох наукових напрямків досліджень і різних галузей застосування. Використання імпедансних структур також дозволяє розв'язати проблему мініатюризації антенно-хвильових структур.

Велика кількість наукових праць (включаючи публікації авторів Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна) за останні десятиліття, які стосуються досліджень тонких вібраторних і щілинних випромінювачів дозволили у своїй сукупності сформулювати сучасну теорію таких випромінювачів, що поєднує 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 їхніх 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: багатofункціональність; багатоелементність; інтеграція й модифікація структурних складових для мінімізації масо-габаритних параметрів і забезпечення електромагнітної сумісності радіoeлектронних засобів (РЕЗ); використання композитних і метаматеріалів; формування електромагнітних полів з необхідними просторово-енергетичними, поляризаційними й частотними характеристиками. Насамперед, у рамках розроблених числово-аналітичних методів не визначені способи розв'язання граничних задач для цілого класу перспективних для практичних застосувань комбінованих вібраторно-щілинних випромінюючих структур. Це комбіновані випромінюючі вібраторно-щілинні структури у хвилевідних трактах з імпедансними вібраторними елементами (з нерегулярними геометричними й електрофізичними параметрами) усередині й зовні хвилеводу, щілинні, вібраторні й комбіновані вібраторно-щілинні структури на сферичних поверхнях і в електродинамічних об'ємах з імпедансними поверхнями, хвилевідні зчленування з вібраторно-щілинними структурами в області зв'язку й імпедансними поверхнями, антенні решітки з імпедансними вібраторними й комбінованими вібраторно-щілинними елементами, і т.п.

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

Дисертація виконувалася в рамках досліджень, що проводились на кафедрі фізичної і біомедицинської електроніки та комплексних інформаційних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна в період з 2011 по 2021 р. відповідно до планів 10 держбюджетних науково-дослідних робіт.

Наукова новизна результатів, отриманих у роботі, полягає в наступному:

- *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 потужності 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 і між усіма фізичними каналами поділу потужності на окремих частотах при задовільному узгодженні;
- *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 добром електричних параметрів хвилевідних пристроїв можна забезпечити необхідний рівень передачі потужності з основного хвелеводу в бічний (в інтервалі $0 \leq |S_e|^2 \leq 0,84$).

Уперше сформульовано загальну резонансну умову для хвилевідних зчленувань із діелектричною вставкою в області щілини зв'язку й установлено точність визначення резонансної довжини хвилі з цієї умови;

- ♦ *уперше* розв'язано задачі збудження й випромінювання електромагнітних хвиль вузькою резонансною щілиною, прорізаною в ідеально провідній сфері довільного радіуса, збуджуваною напівнескінченним прямокутним хвелеводом з імпедансним торцем; прямокутним хвелеводом з одно- і двощілинним прохідним резонатором. Виявлено, що зміна значень матеріальних параметрів магнітодіелектрика, з якого виконано імпедансне покриття торця хвелеводу, а отже, і значень його поверхневого імпедансу дозволяє здійснити перебудову довжини хвилі резонансного випромінювання випромінювача при збереженні його вхідного узгодження в межах (30-36) %, що відповідає половині діапазону одномодового режиму хвелеводу. 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 Клевина на сфері;
- ♦ *уперше* узагальненим методом наведених ЕМРС визначено розподіли струмів у багатоелементній комбінованій вібраторно-щілинній антенній решітці з імпедансними випромінювачами, яка поєднує щілину, прорізану в стінці прямокутного хвелеводу й систему пасивних імпедансних вібраторів, розміщених над щілиною у вільному півпросторі. Виявлено, що така система дозволяє одержати діаграму спрямованості (ДС), подібну 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 хвелеводу при збудженні хвелеводу вищими типами хвиль на різних частотах;
- ♦ запропоновано *новий* метод імпедансного синтезу ДС випромінювання антенних решіток з імпедансними вібраторними й щілинними елементами. Уперше отримано аналітичні формули для дійсної й уявної частин

поверхневих імпедансів елементів решіток, які забезпечують формування максимуму ДС випромінювання решіток у заданому напрямку.

На основі використаних автором фізично коректних і математично строгих числово-аналітичних методів проведено числові дослідження характеристик розглянутих структур, які дозволили виявити низку *нових фізичних закономірностей*.

1) У випадку поперечної щілини в широкій стінці прямокутного хвильоводу, усередині якого розташовано два імпедансних монополі:

- виявлено, що при розташуванні монополів безпосередньо під щілиною вони практично не впливають на коефіцієнт випромінювання структури, у той же час вібратори з різними значеннями поверхневого імпедансу або з різними розподілами імпедансу уздовж них дозволяють оптимізувати вхідне узгодження випромінювача або одержати 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 зсуві осі одного з вібраторів щодо осі щілини на величину, кратну $z_0 = \lambda_g / 2$ й забезпеченні близьких значень резонансних частот щілини й вібратора, що реалізується при використанні монополів зі змінними уздовж них індуктивними імпедансами;

- виявлено, що зсув монополя в 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) Для комбінованих вібраторно-щілинних структур типу Клевіна:

- 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, а також розташування усередині хвильоводу додаткового імпедансного вібраторного настроювального елемента.

3) У результаті числового моделювання для задач збудження електромагнітних полів у хвильовідних E -площинних Т-подібних зчленуваннях:

- визначено умови збільшення коефіцієнта передачі за потужністю в бічний хвильовід P_{13} при одночасному зменшенні величин P_{12} і P_{11} на резонансній довжині хвилі щілини й монополя, що має місце при розташуванні імпедансного монополя усередині основного хвильоводу при величинах зсувів осі вібратора щодо осі

щілини кратних $\lambda_G^{Sres} / 8$, максимальне значення P_{13} (до 90 %) спостерігається при $z_0 = \lambda_G^{Sres} / 2$;

– виявлено, що зсув монополя в площині поперечного перерізу хвилеводу 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 хвилеводу при задовільному ($KСХН \leq 2,0$) узгодженні в плечі 1 при використанні монополів однакової довжини, але з різними значеннями й 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 ($KСВН \leq 2,0$) узгодженні в плечі 1;

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

4) Для задач збудження електромагнітних полів у хвилевідних зчленуваннях з діелектричними вставками й імпедансними поверхнями визначено, що для заданої довжини хвилі добром 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 кілька одиниць відсотків.

5) Для задачі збудження й 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:

– визначено, що при розрахунках енергетичних характеристик сферичного випромінювача в околі резонансу використання провідності щілини в нескінченному екрані стає коректним для $kR \geq 10$, тоді як удалині 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 здійснити 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 більшу крутість, а її форма наближається до прямокутної. Наявність у діафрагмі другої

щілини приводить до звуження смуги пропускання за рівнем половинної потужності випромінювання до 50 % і повному відбиттю падаючої на діафрагму хвилі типу H_{10} на певній довжині хвилі, яка залежить від довжини щілини і її положення.

6) У 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. Геометричні параметри випромінювача Клевіна, визначені для нескінченного екрана, зберігаються для сфер з дифракційним радіусом $kR \geq 20$.

7) При розв'язанні задачі випромінювання електромагнітних хвиль багатоеlementною комбінованою вібраторно-щілинною решіткою з імпедансними випромінювачами, яка поєднує щілину, прорізану в стінці прямокутного хвилеводу й систему пасивних імпедансних вібраторів, розміщених над щілиною у вільному півпросторі виявлено, що при оптимізації параметрів випромінювачів така система дозволяє одержати діаграму спрямованості, подібну ДС директорної антени (решітки Ягі-Уда). При цьому забезпечується добре узгодження з хвильовим трактом ($K_{СХН} < 1,1$).

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

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

Вірогідність і обґрунтованість результатів роботи визначаються строгою постановкою досліджуваних електродинамічних задач та підтверджуються тим, що використовувані моделі й допущення є фізично коректними, при розв'язанні задач використовуються добре апробовані методи теорії електродинаміки і математичної фізики, а отримані результати узгоджуються з оригінальними експериментальними даними або даними, відомими з літературних джерел для окремих випадків.

Практичне/теоретичне значення отриманих результатів. Отримані в дисертаційній роботі результати підвищують розуміння процесів формування електромагнітних полів вібраторними, щілинними й комбінованими вібраторно-щілинними структурами. Розв'язки складних задач розсіювання й випромінювання електромагнітних хвиль у строгій самоузгодженій постановці розкривають потенційні можливості для розробки пропозицій щодо цілеспрямованого вибору електродинамічних принципів і способів технічної реалізації випромінюючих структур із заданими просторово-енергетичними й частотними характеристиками. Побудовані в роботі математичні моделі й

розвинені електродинамічні методи розрахунків характеристик різноманітних комбінованих вібраторно-щілинних випромінюючих структур і їхніх багатоеlementних систем, які дозволяють провести багатопараметричний аналіз фізичних властивостей електромагнітних полів у таких системах і дати чітку фізичну інтерпретацію теоретичних і експериментальних даних, отриманих при їхньому 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 електромагнітних полів комбінованими вібраторно-щілинними структурами з імпедансними вібраторними й щілинними випромінювачами в різних електродинамічних об'ємах, зокрема, з імпедансними границями, складають основу для розробки й створення нової елементної бази радіoeлектронних засобів метрового й мікрохвильового діапазонів, яка дозволяє значно розширити їхні функціональні можливості. Вони перспективні для застосування при розв'язанні проблеми забезпечення електромагнітної сумісності РЕЗ, заводозахисності, 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 їхньому виконанні. Отримані результати ввійшли також у цикл наукових праць «Створення випромінюючих структур багатofункціональних радіoeлектронних систем», відзначеного Державною премією України в галузі науки і техніки в 2016 році.

Дисертація являє собою **закінчене наукове дослідження**, у результаті якого отримано нові фундаментальні результати теорії лінійних випромінювачів, що визначає у своїй сукупності новий напрямок досліджень багатоеlementних структур імпедансних вібраторів і щілинних елементів з використанням запропонованого гібридного числово-аналітичного методу. Зміст дисертації відповідає тематиці і паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика. Дисертація й автореферат оформлені відповідно до вимог Атестаційної колегії Міністерства освіти і науки України. **Зміст автореферату** досить повно й ідентично відбиває її основні положення. 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 щілинними випромінювачами і їх системами в прямокутному хвилеводі, у його докторській дисертації не використовувалися.

Матеріали дисертації пройшли необхідну **апробацію** на конференціях і семінарах за участю фахівців із відповідної тематики й досить повно **викладені** в 5 монографіях (3 з яких – англomовні, у видавництві “Springer”), 2 розділах монографій і 23 статтях: 6 публікацій – у спеціалізованих виданнях України, 17 публікацій – у закордонних спеціалізованих виданнях, які входять до

міжнародних наукометричних баз, а також у 31 публікації (30 з яких входять до наукометричної бази "Scopus") в матеріалах 21 міжнародної наукової конференції.

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

1. Базові структури, а саме, вібратори й щілини, у роботі є тонкими, а, отже, одномірними, що звужує клас потенційних структур, які можуть бути розглянуті. Зокрема, практичний інтерес становить моделювання круглих отворів зв'язку, використовуваних для збудження мікросмужкових антен.

2. У роботі розглянуто питання про збудження апертури на сферичній поверхні. Аналогічні задачі могли б бути розглянуті й на циліндричній поверхні, зокрема, для решіток із апертур.

3. Із результатів роботи не зрозуміло, як близько один до одного можуть бути розташовані вібратори й щілини.

Зазначені недоліки роботи не є принциповими й не знижують її високий науковий рівень. Тому на підставі вищевикладеного вважаю, що дисертаційна робота «ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ КОМБІНОВАНИМИ ВІБРАТОРНО-ЩІЛИННИМИ ВИПРОМІНЮЮЧИМИ СТРУКТУРАМИ В ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄМАХ З ІМПЕДАНСНИМИ ГРАНИЦЯМИ» відповідає вимогам Атестаційної колегії Міністерства освіти і науки України до докторських дисертацій, а її автор, Бердник С. Л., заслуговує присудження йому вченого ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент,
Старший науковий співробітник Інституту
радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України,
доктор фіз.-мат. наук,
старший науковий співробітник

О. Є. Свеженцев

Підпис доктора фіз.-мат. наук,
старшого наукового співробітника О. Є. Свеженцева засвідчую:
Учений секретар ІРЕ НАН України
канд. фіз.-мат. наук



І. Є. Почаніна

Відрук овершано 26 квітня 2021 р

Учений секретар спецради