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

МЕДВЄДЄВ МИКОЛА ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 537.87:621.396.677

Reepe

ЗБУДЖЕННЯ ТА ВИПРОМІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ СИСТЕМОЮ ЩІЛИН, ПРОРІЗАНИХ У ЗОВНІШНЬОМУ ПРОВІДНИКУ КОАКСІАЛЬНОЇ ЛІНІЇ

01.04.03 - радіофізика

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата 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 керівник:

доктор фізико-математичних наук, професор Катрич Віктор Олександрович, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна МОН України, професор кафедри фізичної і біомедичної електроніки та комплексних інформаційних технологій.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Свеженцев Олександр Євгенович, Інститут радіофізики та електроніки імені О. Я. Усикова НАН України, старший науковий співробітник відділу теорії дифракції та дифракційної електроніки;

доктор фізико-математичних наук, професор Чурюмов Геннадій Іванович, Харківський національний університет радіоелектроніки МОН України, професор кафедри фізичних основ електронної техніки.

Захист відбудеться «<u>30</u>» <u>вершени</u> 2021 р. о <u>13</u> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: Україна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4, ауд. 3-9.

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

Автореферат розісланий «<u>46</u>» <u>сарми</u> 2021 p.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради

loffing

Юрій АРКУША

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Для розв'язання багатьох прикладних задач радіофізики й електроніки в галузі створення сучасних радіоелектронних систем і радіотехнічних комплексів, основними складовими елементами яких є приймально-передавальні антенні системи та пристрої антеннофідерного тракту, широке застосування мають саме хвилеводно-щілинні структури. Це, зокрема, антени невиступаючого типу на аерокосмічних апаратах, антени радіометрів, навігаційних систем, систем аерокосмічного та наземного зв'язку, сучасних НВЧ-пристроїв та обладнання, антени радіолокаційних систем, систем керування, виявлення, зв'язку та інших пристроїв, систем і комплексів різного призначення для різних сфер і галузей застосування й умов їхнього базування.

Різноманіття форм щілинних елементів, розташування їх у різного типу хвилеведучих трактах, і можливість використання особливостей режимів їхнього збудження є основою для розв'язання багатьох задач зі створення ефективних випромінювальних пристроїв і систем з необхідними масогабаритними, технічними та електродинамічними характеристиками. Такі пристрої є базовими елементами для створення сучасних НВЧ-систем і поліпшення робочих характеристик існуючих радіоелектронних систем і пристроїв, оскільки забезпечують високу функціональну ефективність їхнього практичного застосування. Освоєння НВЧ діапазону хвиль пов'язане також із перспективністю застосування випромінювальних пристроїв високоефективних широкосмугових різної конфігурації на основі i випромінювальних щілинних дозволяють систем базі структур, які на використовувати нові функціональні особливості таких елементів і вузлів.

Коаксіально-щілинні антени у вигляді систем щілин у зовнішніх провідниках коаксіальних ліній – так звані випромінювальні кабелі – широко застосовуються в найрізноманітніших радіоелектронних і радіотехнічних системах та комплексах. Використовуються антени подібного типу в мобільному, стільниковому зв'язку, системах забезпечення зв'язку у важкодоступних місцях, у радарних установках, охоронних системах тощо. Особливе місце займають дослідження, проведені за допомогою випромінювальних кабелів у медицині та біології. В останні роки спостерігається бурхливий розвиток засобів рухомого зв'язку, радіозв'язку спеціального призначення в місцях, що мають певну специфіку відносно поширення радіохвиль: метрополітенах, транспортних тунелях, підземних торгівельних центрах тощо. Швидко розвиваються корпоративні мережі, в тому числі на територіях промислових і спеціальних комплексів, що являють собою сильно екрановані споруди виробничого, службового й іншого призначення. У всіх вказаних випадках ефективними антенами є випромінювальні кабелі, оскільки вони досить просто збудження великої кількості випромінювачів, забезпечують малі габарити. порівняно низьку вартість та не мають частин, що виступають. Різноманіття галузей використання випромінювальних кабелів, різні вимоги, що висуваються до параметрів і електродинамічних характеристик випромінювальних систем, ставлять перед розробниками антенних систем задачі з вивчення електромагнітних полів у всіх зонах спостереження таких випромінювачів. Випромінювання у ближній зоні прорізаних в екранах надмініатюрних кабелів, використовується в шілин.

діагностичній терапії, у лікувальній гіпертермії – локальному внутрішньому нагріванні тканин або органів людини. Найважливішою вимогою при цьому є забезпечення високого і стабільного коефіцієнта випромінювання у матеріальне середовище із втратами за умов малої кількості щілинних випромінювачів. Для стільникового та іншого бездротового зв'язку в тунелях, у метрополітені й інших підземних спорудах із використанням випромінювального кабелю також необхідно знати розподіл електромагнітного поля на відстанях, менших робочої довжини хвилі, тобто в області ближнього поля. При цьому важливо мати рівномірний розподіл поля вздовж коаксіально-щілинного фідеру на опромінюваних ділянках з великою протяжністю. Поля у дальній зоні, що створюються коаксіальнощілинними системами, застосовують, наприклад, у радарних установках, у низькоорбітальних мобільних комплексах, наприклад, LEO-MSAT, охоронних системах тощо.

Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених випромінювальним літературі відсутні вичерпні лослідження коаксіальним кабелям. v характеристик коаксіально-щілинних електродинамічних антен. Задача про випромінювання електромагнітних хвиль системою щілин в екрані коаксіальної лінії є багатопараметричною, і багато питань, які пов'язані з особливостями розрахунку характеристик випромінюваних електромагнітних полів та практичною реалізацією антенних решіток з різними вимогами до їхніх параметрів і електродинамічних характеристик, перспективних для застосування у радіоелектронних пристроях і системах різного призначення, не наведено в літературі.

Тому актуальною є задача розвитку теорії, створення математичних моделей і методів розрахунку електродинамічних структур різних конфігурацій на базі коаксіальної лінії у багатопараметричному її формулюванні, а також дослідження цих структур у широких діапазонах зміни геометричних та електрофізичних виявлення фізичних закономірностей метою параметрів 3 формування випромінюваного електромагнітного поля коаксіально-щілинними структурами, що становить основу для вироблення рекомендацій з розробки, проєктування та реалізації конкурентоспроможних за новими функціональними технічної можливостями випромінювальних елементів, структур, пристроїв і систем НВЧ діапазону хвиль та розширенню їхньої елементної бази.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження проводились відповідно до таких фундаментальних науково-дослідних робіт Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна: «Збудження, розсіяння та формування електромагнітних полів магнітними та електричними випромінюючими структурами у матеріальному середовищі» (номер державної реєстрації 0108U001643, 2008 р.-2010 р.), «Електродинаміка систем лінійних випромінювачів: вібраторів з розподіленим імпедансом і вузьких щілин» (номер державної реєстрації 011U002465, 2011 р.–2013 р.), «Формування дифракційних полів у складних електродинамічних об'ємах з ідеально провідними й імпедансними границями за допомогою метало-діелектричних включень та отворів зв'язку» (номер 0114U002584, 2014 p.-2016 p.), державної реєстрації «Електродинамічні характеристики багатофункціональних випромінюючих структур: випромінювання, розсіяння, дифракція, імпедансні покриття, крайові ефекти» (номер державної

реєстрації 0117U004848, 2017 р.–2019 р.), в яких автор був виконавцем і його науковий внесок відображено в дисертації.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є виявлення фізичних закономірностей збудження та випромінювання електромагнітних полів поодинокими кільцевими та дуговими щілинами та системами цих щілин, розташованих у зовнішньому провіднику коаксіальної лінії на основі створених фізико-математичних моделей цих процесів, розвинення методів і створення алгоритмів, придатних для проведення багатопараметричних розрахунків електродинамічних характеристик таких випромінювальних коаксіально-щілинних структур за умов довільної кількості випромінювальних щілинних елементів і їх геометричних і електрофізичних параметрів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

• розробити математичні моделі, розвинути методи розрахунку та дослідити поодинокої характеристики дугової поперечної щілини, електродинамічні провіднику прорізаної зовнішньому нескінченної коаксіальної лінії V v багатопараметричній постановці задачі;

• розробити математичні моделі, розвинути методи розрахунку та дослідити електродинамічні характеристики поодинокої кільцевої поперечної щілини, прорізаної у зовнішньому провіднику нескінченної коаксіальної лінії у багатопараметричній постановці задачі;

• розробити математичні моделі, розвинути методи розрахунку та дослідити електродинамічні характеристики систем поперечних дугових і кільцевих щілин, прорізаних у зовнішньому провіднику нескінченної коаксіальної лінії у багатопараметричній постановці задачі;

• розробити математичні моделі, розвинути методи розрахунку та дослідити електродинамічні характеристики поодиноких дугових і кільцевих поперечних щілин і їх систем, прорізаних у зовнішньому провіднику навантаженої коаксіальної лінії у багатопараметричній постановці задачі.

Об'єктом дослідження в дисертаційній роботі є фізичні процеси збудження, випромінювання та розсіювання електромагнітних полів, що створюються щілинними випромінювачами, розташованими у зовнішньому провіднику коаксіальної лінії.

Предметом дослідження є багатопараметричні залежності електродинамічних характеристик (частотно-енергетичних, частотно-просторових) електромагнітних полів від геометричних і електрофізичних параметрів коаксіальної лінії, систем поперечних кільцевих або дугових щілин та збуджуваних електродинамічних об'ємів.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань у роботі використано такі методи: метод наведених магніторушійних сил (використано для побудови математичної моделі коаксіально-щілинних систем і визначення їхніх характеристик), метод Гальоркіна (використано для визначення дотичної складової поля у щілинному випромінювачі), метод функції Гріна (використано для отримання власних і взаємних зовнішніх провідностей щілинних випромінювачів на поверхні провідного циліндра), метод власних хвиль (використано для отримання власних і взаємних внутрішніх провідностей щілинних випромінювачів в екрані коаксіальної лінії), методи теорії функцій комплексної змінної (використані для визначення амплітудно-фазових розподілів, активних і реактивних складових провідностей), методи обчислювальної математики та програмування (використані для обчислення сум рядів, інтегралів при числовому моделюванні та розрахунках).

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розвитку теорії, математичних моделей і методів розрахунку електродинамічних характеристик коаксіально-щілинних випромінювачів довільної довжини й багатопараметричних систем таких випромінювачів, а також у виявленні нових фізичних особливостей і закономірностей у формуванні електромагнітного поля такими структурами.

Уперше методи розв'язання інтегральних рівнянь (метод моментів, метод Гальоркіна, метод наведених магніторушійних сил) застосовано для розв'язання задачі збудження та випромінювання електромагнітних хвиль поодинокою та системами поперечних кільцевих і дугових щілин, прорізаних в екрані коаксіальної лінії з довільним кінцевим навантаженням і проведено дослідження та багатопараметричний аналіз цих випромінювачів. Встановлено фізичні залежності, які пов'язують коефіцієнти випромінювання та відбиття, провідності щілин, амплітудно-фазові розподіли поля на випромінювальній апертурі та діаграми спрямованості цих коаксіально-щілинних структур із розмірами щілинних елементів, радіусами провідників фідера та діелектричними характеристиками його зовнішнього та внутрішнього середовища, відстанями та положеннями щілин у системі, параметрами кінцевого навантаження лінії у широкому діапазоні довжин хвиль.

Встановлено, що діапазон довжин хвиль (Δλ/λ_{рез}) за рівнем половинної потужності коефіцієнта випромінювання дугової щілини у нескінченній коаксіальній лінії досягає 50% ÷ 60%, в залежності від довжини щілини.

Уперше встановлено, що якщо резонансна довжина хвилі дугової щілини довжини $l = \pi a_2$ (a_2 – радіус зовнішнього провідника коаксіальної лінії) знаходиться у багатомодовому діапазоні довжин хвиль фідеру ($\lambda_{pe3} < \lambda_{H11}$), що має місце при відношенні радіусів коаксіальної лінії меншому ніж у двічі ($a_2/a_1 < 2$), це призводить до зниження коефіцієнта випромінювання та спотворення форми залежності коефіцієнта випромінювання від довжини хвилі. Для уникнення цього ефекту отримано наближені вирази, що пов'язують радіуси коаксіальної лінії із довжиною випромінювача.

Встановлено, що характер випромінювання поодинокої кільцевої щілини в зовнішньому провіднику нескінченної коаксіальної лінії є нерезонансним, тому рівень коефіцієнта випромінювання не може досягати значення 0,5 за будь-яких умов. Показано, що вузька кільцева щілина у екрані коаксіальної лінії здатна ефективно випромінювати на будь-якій довжині хвилі, а її коефіцієнт випромінювання обмежується лише параметрами фідеру та діелектриків, що заповнюють внутрішній і зовнішній об'єми коаксіальної лінії.

Уперше виявлено, що за умов випромінювання у матеріальне середовище з високими діелектричними проникностями ($\varepsilon^e > \varepsilon^i$) діаграма спрямованості систем щілин має частотнонезалежну головну пелюстку, форма та напрямок якої є постійними. Встановлено, що в окремих випадках при розрахунках енергетичних характеристик коаксіально-щілинної системи, яка випромінює у зовнішнє

середовище з великими втратами (tg δ ≥ 0,8), можна знехтувати взаємними зв'язками між випромінювачами, які розташовані на відстанях більших за чверть довжини хвилі, що істотно скорочує час розрахунків.

Уперше реалізовано спосіб поліпшення характеристик коаксіально-щілинної антенної решітки шляхом створення системи дугових щілин з нерегулярними довжинами випромінювачів при забезпеченні коефіцієнта випромінювання більшого за 0,95 у широкому діапазоні робочих довжин хвиль ($\Delta\lambda/\lambda_{cep} = 44\%$), постійного або спадного до країв амплітудного розподілу поля та рівня бічних пелюсток діаграми спрямованості, що не перевищує значення 0,15.

Виявлено, що у напівнескінченній коаксіальній лінії діапазон робочих довжин хвиль поодинокої дугової щілини за рівнем коефіцієнта випромінювання $|\Gamma_{\Sigma}|^2 \ge 0.9$ може досягати $\Delta\lambda/\lambda_{pes} = 42\%$. Надмініатюрна по відношенню до довжини хвилі кільцева щілина (l = 3,77 мм) зберігає високий коефіцієнт випромінювання ($|\Gamma_{\Sigma}|^2 \ge 0.9$) для довжин хвиль від 130 мм до 300 мм коли відстань від щілини до торцевої стінки (D_{sh}) задовольняє умові $D_{sh}/\lambda_{\varepsilon} < 0.1$.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Побудовані математичні моделі коаксіально-щілинних випромінювальних структур та створені обчислювальні програми, які дозволяють провести багатопараметричний аналіз фізичних властивостей полів у таких структурах, а також виявлені закономірності частотно-просторових і частотно-енергетичних характеристик цих полів, є основою для створення випромінювальних пристроїв із якісно новими електродинамічними характеристиками.

2. Результати дисертаційної роботи можуть бути застосовані при створенні новітніх або покращення існуючих систем бездротового зв'язку, у тому числі у важкодоступних місцях, систем виявлення, діагностичного та медичного обладнання, зокрема, в якості опромінювачів для внутрішньотканинної гіпертермії.

Особистий внесок здобувача.

У роботах [1, 2, 18, 19] автору належить отримання математичних виразів, що описують електродинамічні характеристики поодинокої дугової та кільцевої щілини, прорізаної в зовнішньому провіднику коаксіальної лінії, розробка комп'ютерної програми для числового розв'язання задачі, проведення розрахунків та отримання числових результатів, участь в аналізі отриманих даних і написанні наукових робіт.

У роботах [3, 4, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 17, 20,] автору належить отримання математичних виразів, що описують електродинамічні характеристики систем кільцевих і дугових щілин, прорізаних у зовнішньому провіднику коаксіальної лінії, у тому числі за умов випромінювання у матеріальне зовнішнє середовище, розробка комп'ютерної програми для числового розв'язання задачі, проведення розрахунків та отримання числових результатів, участь в аналізі отриманих даних і написанні наукових робіт.

У роботах [5, 7, 11, 15] автору належить отримання математичних виразів, що описують електродинамічні характеристики поодиноких і систем кільцевих і дугових щілин, прорізаних у зовнішньому провіднику напівнескінченної коаксіальної лінії та лінії з довільним кінцевим навантаженням, розробка комп'ютерної програми для числового розв'язання задачі, виконання розрахунків та отримання числових результатів, участь в аналізі отриманих даних і написанні наукових робіт.

матеріалів дисертації. Наукові результати, отримані Апробація В дисертаційній роботі, доповідалися, обговорювалися та публікувалися на наступних 12 міжнародних та українських конференціях і симпозіумах: Міжнародній Кримській конференції «СВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» (XXI, КриМіКо'2011, Севастополь, Україна, 2011 р.; XXII, КриМіКо'2012, Севастополь, 2012 p.); International Conference on «Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals» (6th, UWBUSIS'12, Sevastopol, Ukraine, 2012; 7th, UWBUSIS'14, Kharkiv, 2014; 8th, UWBUSIS'16, Odessa, 2016; 9th, UWBUSIS'18, Odessa, 2018); «International Conference on Antenna Theory and Technicques» (9th, ICATT'13, Odessa, 2013; 10th, ICATT'15, Kharkiv, 2015; 11th, ICATT'17, Kyiv, 2017); International Conference «RadioElectronics and InfoCommunications», UkrMiCo'2016, Kviv, 2016; 22nd International Seminar/Workshop «Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory», DIPED'2017, Dnipro, 2017; 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON'19, Lviv, 2019.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано у 20 друкованих наукових працях, з них 8 статей у вітчизняних і зарубіжних спеціалізованих наукових виданнях (1 стаття, що входить до наукометричної бази даних Scopus), 3 з яких додатково відображають наукові результати дисертації, і у 12 матеріалах та тезах доповідей на міжнародних конференціях. Усі опубліковані наукові роботи відповідають темі дисертаційної роботи.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг дисертації становить 220 сторінок, з яких 161 сторінка основного тексту. Список використаної літератури на 24 сторінках включає в себе 192 найменування. Всього в дисертації 79 рисунків, 5 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі надано загальну характеристику стану задачі, показано її актуальність, обґрунтовано потребу проведення досліджень за темою дисертації, сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи, вказано об'єкт, предмет і методи досліджень, новизну та практичне значення отриманих результатів. Викладено зв'язок роботи з науково-дослідними роботами.

У першому розділі «Аналіз стану та методи розв'язання задачі випромінювання електромагнітних хвиль щілинними системами у циліндричних поверхнях» виконано огляд робіт, які стосуються теми дисертації, представлені основні досягнення в області дослідження електромагнітних характеристик коаксіально-щілинних структур та викладена актуальність і практична потреба вивчення електромагнітних полів, створюваних системами щілин у зовнішньому провіднику коаксіальної лінії.

З аналітичного огляду науково-технічної літератури випливає, що для розв'язання важливих практичних задач необхідно формулювати граничні задачі у їх строгій постановці з урахуванням усіх параметрів випромінювальної структури й одержувати результати із застосуванням спеціальних методів електродинаміки й обчислювальної математики.

У даний час відомі розв'язки багатопараметричних задач аналізу електромагнітних характеристик коаксіально-щілинних структур не мають повного завершеного характеру.

У розділі проведено порівняльний аналіз різних методів розв'язання крайової задачі електродинаміки зі збудження та випромінювання електромагнітних полів щілинними системами у металевій поверхні. Порівнюючи основні методи розв'язання задач розсіювання хвилеводних хвиль щілинними неоднорідностями, можна дійти висновку, що найбільш загальним, простим та ефективним методом розв'язання векторних задач для щілинних випромінювачів є метод наведених магніторушійних сил у сукупності з методом Гальоркіна. Вони надають можливість проведення комплексних досліджень багатоелементних структур із довільними параметрами випромінювача.

методу наведених магніторушійних Суть сил полягає v TOMY, ШО умову використовуючи граничну неперервності тангенціальних складових магнітного поля на поверхні щілин та апроксимуючи електричне поле на поверхні щілин лінійними комбінаціями базисних функцій, отримують систему лінійних відносно невідомих коефіцієнтів алгебраїчних рівнянь базисних функцій. Коефіцієнтами у системі лінійних алгебраїчних рівнянь є власні та взаємні часткові провідності щілин, обумовлені парціальними функціями розподілу поля на щілинах. Для визначення парціальних провідностей необхідно розв'язати задачу збудження щілинами електромагнітних полів у об'ємах, що ними зв'язані. Магнітні поля у внутрішньому об'ємах системи зовнішньому та визначають вихолячи 3 координатних особливостей задачі, наприклад, за допомогою методу функції Гріна.

У другому розділі «Збудження та випромінювання електромагнітних хвиль прорізаною поперечною щілиною, зовнішньому провіднику поодинокою у електродинамічну лінії» розв'язано збудження коаксіальної задачу та випромінювання електромагнітних хвиль поперечними поодинокими дуговими (рис. 1, а) та кільцевими (рис. 1, б) координатними щілинами, прорізаними в екрані коаксіальної лінії передачі, в якій поширюється хвиля основного Т-типу, з урахуванням впливу вищих типів хвиль. Вважається, що поодинока щілина у

нескінченній коаксіальній лінії збуджується основною Т-хвилею одиничної потужності, щілина електрично вузька (d < l, $d << \lambda$), екран коаксіальної лінії нескінченно тонкий провідний. та ідеально Згідно 3 ЦИМ припущенням, спираючись на симетрію структури основної хвилі фідері, y вважаємо, що електричне поле на поверхні щілини має лише поперечну складову й описується лінійною комбінацією тригонометричних функцій для дугової щілини та є постійним у кільцевій щілині.



Рис. 1 Геометрія системи

Згідно з методом наведених магніторушійних сил отримуються в явному вигляді аналітичні вирази, що визначають внутрішні та зовнішні, власні та взаємні парціальні провідності випромінювача та магніторушійні сили. Магнітні поля у

зовнішньому та внутрішньому об'ємах системи щілина-фідер визначаються за допомогою методу функції Гріна та методу власних хвиль. Далі, провідності, амплітуди базисних функцій електричного поля на поверхні щілини, що визначаються з системи алгебраїчних рівнянь, а також коефіцієнти випромінювання $(|\Gamma_{\Sigma}|^2)$ та відбиття $(|\Gamma_1|)$ щілини визначаються числовими методами.

Проведені багатопараметричні дослідження діапазонних залежностей енергетичних характеристик поперечної дугової та кільцевої щіліни, прорізаних у екрані коаксіальної лінії. Під час досліджень у широких межах варіювалися наступні параметри структури: довжина щілини (l), ширина щілини (d), радіуси внутрішнього та зовнішнього провідників коаксіальної лінії (a_1 та a_2 відповідно), величини діелектричних проникностей внутрішнього та зовнішнього середовища фідеру (ε^i та ε^e відповідно), значення тангенса кута діелектричних втрат зовнішнього середовища (tg δ), довжина хвилі у вільному просторі (λ).

У результаті досліджень електродинамічних характеристик дугової щілини встановлено, що у межах одномодового режиму роботи фідеру амплітуда (V) першої (p = 1) парціальної складової поля на поверхні щілини значно перевищує інші (рис. 2), тож з точністю не гірше ніж 10% для опису електричного поля на поверхні щілини у одномодовому режимі можна обмежитися однією тригонометричною базисною функцією, та з точністю не гірше 5% - трьома. У багатомодовому режимі спостерігаються резонанси вищих гармонік поля (V₃, V₅ та інші), тож при довжинах хвиль, менших за $\lambda_{\rm кp} \approx \pi(a_1+a_2)$, напівхвильова апроксимація поля у дуговій щілини неприпустима. Слід підкреслити, що щілина збуджується *T*-хвилею одиничної потужності.



Збільшення довжини дугової щілини та відповідне збільшення резонансної довжини хвилі ($l/\lambda_{pes} \approx 0,5$) призводить до істотного зростання діапазону робочих довжин хвиль за рівнем $|\Gamma_{\Sigma}|^2 = 0.5 |\Gamma_{\Sigma}|^2_{max}$ (рис. 3, криві 1-2 відповідають $l/2\pi a_2 = 0.3$; 0,5; 0,8). Збільшення ширини щілини також приводить до збільшення смуги робочих довжин хвиль. Встановлено, що для ефективного випромінювання електромагнітних хвиль дуговою щілиною ($l/2\pi a_2 = 0,5$) відношення a_2/a_1 не повинно бути меншим за 2. При малих значеннях відношення a_2/a_1 резонансна довжина хвилі випромінювача зміщується у діапазон багатомодового режиму, що призводить до спотворення характеристик, зростання коефіцієнта відбиття та зниження енергетичних коефіцієнта випромінювання (рис. 4, криві 1-5 відповідають $a_1 = 1$; 2,5; 6; 8; 10 мм, *a*₂ = 12 мм).

Змінюючи діелектричні проникності діелектриків всередині та зовні коаксіальної лінії, можна керувати величинами коефіцієнтів випромінювання та відбиття, резонансною довжиною хвилі та робочою смугою частот дугової щілини (на рис. 5 криві 1-5 відповідають $\varepsilon^i = 1$; 2; 4; 5; 8, а на рис. 6, криві 1-4 відповідають $\varepsilon^e = 2$; 4; 6; 8 при $a_2 = 12$ мм, 5 – $\varepsilon^e = 55$ при $a_2 = 0,6$ мм). При довільних значеннях діелектричної проникності можна визначити приблизне значення робочої довжини хвилі за допомогою усередненої діелектричної проникності. Збільшення tg δ матеріального середовища, призводить до суттєвого зменшення максимальних значень енергетичних коефіцієнтів в робочій смузі довжин хвиль та до відповідного розширення діапазону за рівнем $|\Gamma_{\Sigma}|^2 = 0,5|\Gamma_{\Sigma}|^2_{max}$, що важливо у медичному використанні цих випромінювачів (рис. 7, криві 1-3 відповідають tg $\delta = 0$; 0,1; 0,8).



Дослідження кільцевої щілини показали, що вона не може випромінювати 50% падаючої на неї потужності та має нерезонансний характер випромінювання. При цьому діапазон робочих довжин хвиль кільцевої щілини значно перевищує відповідний діапазон для дугової. Коефіцієнт відбиття кільцевих щілин при певному співвідношенні між радіусами провідників коаксіальної лінії може досягати значень, близьких до одиниці, а коефіцієнт проходження бути нижчим за один відсоток. При відповідному виборі співвідношення між розмірами a_2 і a_1 можливе створення малогабаритного мініатюрного надширокосмугового випромінювача з високим коефіцієнтом випромінювання та низьким коефіцієнтом відбиття (рис. 8).



При певному виборі величин діелектричних проникностей середовищ всередині (рис. 9, суцільні криві відповідають $a_2 = 12$ мм, пунктирні – $a_2 = 0,6$ мм) та зовні (рис. 10) коаксіальної лінії можливо досягнути балансу внутрішніх та

зовнішніх провідностей кільцевої щілини, що дозволяє отримати максимально досяжний коефіцієнт випромінювання. Втрати у зовнішньому середовищі дещо підвищують коефіцієнт випромінювання кільцевої щілини (рис. 10, криві 1-3 відповідають tg $\delta = 0; 0, 1; 0, 8).$

Таким чином, другому розділі розв'язано V задачу збудження та випромінювання електромагнітних хвиль поперечною дуговою та кільцевою щілиною в екрані коаксіальної лінії. Знайдено магнітне поле, збуджене цією щілиною всередині та зовні фідера, отримано вирази для парціальних внутрішніх і зовнішніх провідностей щілини, досліджено вплив параметрів структури на її електродинамічні характеристики, показано способи керування ними.

третьому розділі «Збудження У та випромінювання електромагнітних хвиль системами щілин, прорізаних у зовнішньому провіднику коаксіальної лінії» розв'язано електродинамічну задачу збудження та випромінювання електромагнітних ХВИЛЬ системами з N поперечних дугових (рис. 11, a) та (рис. 11, б) координатних кільцевих щілин, прорізаних в екрані коаксіальної лінії на довільній відстані *D* одна від одної. Для розв'язання задачі використовувалися такі ж умови та припущення, що були викладені у попередньому розділі. Електричне поле на поверхні дугової щілини апроксимується однією тригонометричною базисною функцією отвору (напівхвильова апроксимація).

Задачу розв'язано методом наведених магніторушійних сил, як було описано вище. Додатково виразів, отриманих ДО У попередньому розділі, були отримані вирази для взаємних парціальних внутрішніх і зовнішніх між щілинами, які провідностей описують взаємодії між випромінювачами у системі як за внутрішнім так і за зовнішнім простором фідеру.

Далі розділі наведені результати y багатопараметричних досліджень діапазонних залежностей енергетичних характеристик систем поперечних дугових і кільцевих



б Рис. 11 Геометрія системи

щілин, прорізаних у екрані коаксіальної лінії. Під час досліджень у широких межах варіювалися такі параметри структури: кількість щілин (N), відстань між щілинами у системі (D), положення щілин уздовж системи, довжина щілини, ширина щілини, радіуси внутрішнього та зовнішнього провідників коаксіальної лінії, величини діелектричних проникностей внутрішнього та зовнішнього середовища фідеру, значення тангенса кута діелектричних втрат зовнішнього середовища, довжина хвилі у вільному просторі.

Проведені діапазонні дослідження залежностей енергетичних коефіцієнтів системи кільцевих щілин показали, що дугових або подібні системи малогабаритними широкосмуговими випромінювальними та структурами. Застосування того чи іншого фідеру, а також вибір кільцевих або дугових щілин певної довжини, дозволяють регулювати середню робочу довжину хвилі та діапазон робочих довжин хвиль. Діапазон робочих довжин хвиль системи поперечних кільцевих щілин обумовлюється переважно особливостями решітки: відстанями між щілинами, діелектричними проникностями діелектриків є^і та є^е. Діапазон робочих довжин хвиль системи дугових щілин у решітці з малою кількістю елементів визначається резонансною довжиною хвилі окремого випромінювача (рис. 12, N = 2; 5; 10 дугових щілин у фідері з $a_2 = 12$ мм). Робочу довжину хвилі для багатоелементних систем дугових щілин слід брати відмінною від резонансної для поодинокого випромінювача, бо це дає можливість вирівняти амплітудний розподіл джерел поля вздовж системи й отримати прийнятну для практики діаграму спрямованості антени. Широкосмуговість системи дозволяє отримати високі коефіцієнти випромінювання в області двопроменевого режиму роботи системи (рис. 13). При розрахунках енергетичних характеристик, амплітудно-фазового розподілу та просторових характеристик коаксіально-щілинної антени необхідно враховувати взаємодію між щілинами як у внутрішньому, так і у зовнішньому просторах фідера. Зовнішня взаємодія між щілинами істотно зменшується при випромінюванні електромагнітних хвиль у середовище з високим втратами. Також високі втрати у навколишньому середовищі приводять до суттєвого зменшення осциляцій частотно-енергетичних кривих за рахунок ослаблення взаємних зв'язків між щілинами по зовнішньому простору, а, отже, і до збільшення діапазону робочих довжин хвиль (рис. 13, tg $\delta = 0$; 0,1; 0,8, N = 5, $a_2 = 0,6$ мм). Змінюючи діелектричне заповнення фідеру можливо узгодити щілинну систему із зовнішнім середовищем із високими значеннями діелектричної проникності. За умови $\varepsilon^e > \varepsilon^i$ решітка щілинних випромінювачів формує частотнонезалежну пелюстку діаграми спрямованості, напрямок та форма якої є постійними у широкому діапазоні довжин хвиль.



Створення геометрично-неоднорідних щілинних систем (різні довжини випромінювачів, нееквідистантність розташування випромінювачів тощо) на базі коаксіальної лінії (на рис. 14 довжина щілини нелінійно збільшується в межах $l_1 = 0,3\pi a_2 \div l_{20} = 0,75\pi a_2$) дозволяє істотно зменшити коефіцієнт відбиття та підвищити рівень випромінювання антени (рис. 14, а), дозволяє керувати робочим діапазоном довжин хвиль антенної системи при збереженні масогабаритних параметрів, дозволяє вплинути та надати необхідної форми амплітудному та фазовому розподілам поля (рис. 14, б, криві 1-4 відповідають λ = 130; 140; 150; 160 мм) вздовж коаксіально-щілинної антени та діаграмі спрямованості (рис. 14, в) у широкому діапазоні довжин хвиль.



Рис. 14 Електродинамічні характеристики нерівномірної системи дугових щілин

Таким чином, у третьому розділі розв'язано електродинамічну задачу збудження та випромінювання електромагнітних хвиль системами поперечних дугових і кільцевих щілин, прорізаних в екрані коаксіальної лінії передачі. Знайдено магнітне поле, збуджене цими системами всередині та зовні фідера, отримано вирази для парціальних внутрішніх і зовнішніх взаємних провідностей щілин, досліджено вплив параметрів структури на її електродинамічні характеристики та характеристики спрямованості, показані способи керування ними.

четвертому розділі «Збудження та випромінювання електромагнітних хвиль поодинокими щілинами та системами шілин. прорізаних у зовнішньому провіднику коаксіальної кінцевим навантаженням» розв'язано лінії 3 електродинамічну задачу збудження та випромінювання електромагнітних ХВИЛЬ поодинокими щілинами та системами поперечних (рис. 15, а) (рис. 15, б) дугових та кільцевих щілин, прорізаних координатних екрані В навантаженої коаксіальної лінії. Довільне кінцеве навантаження в коаксіальній лінії характеризується коефіцієнтом комплексним відбиття та розташовано на відстані D_{sh} від середини ближньої щілини. Для розв'язання задачі використовувалися такі ж умови та припущення, що були викладені у попередніх розділах.

Задачу розв'язано методом наведених б магніторушійних сил, як було описано вище. У Рис. 15 Геометрія системи доповнення до виразів, отриманих у попередніх двох розділах, були отримані вирази для додаткових внесків у власні та взаємні парціальні внутрішні провідності щілинних випромінювачів, які обумовлені наявністю відбитої хвилі від кінцевого навантаження у коаксіальній лінії. Проведено багатопараметричні дослідження діапазонних залежностей енергетичних характеристик поодиноких і систем поперечних дугових та кільцевих щілин, прорізаних у екрані коаксіальної лінії. Під час досліджень у широких межах варіювалися такі параметри структури: модуль (R) і фаза (ψ) коефіцієнта відбиття кінцевого навантаження у коаксіальній лінії, відстань від кінцевого навантаження до середини ближнього випромінювача (D_{sh}), кількість щілин, відстань між щілинами у системі, довжина щілини, ширина щілини, радіуси внутрішнього та зовнішнього провідників коаксіальної лінії, величини діелектричних проникностей внутрішнього та зовнішнього середовища фідеру, значення тангенса кута діелектричних втрат зовнішнього середовища, довжина хвилі у вільному просторі.

Встановлено, що розміщення комплексного кінцевого навантаження із заданими параметрами $\dot{\Gamma} = R \cdot e^{j(\psi + \pi)}$ в коаксіальному фідері з системами поперечних і кільцевих можливість дугових щілин забезпечує додаткову керування характеристиками коаксіально-щілинної антени. У низці випалків кінцеве навантаження дозволяє знизити коефіцієнт відбиття щілинної системи до рівня 0,1 за полем, зменшити габарити випромінювальної системи, поліпшити узгодження коаксіально-щілинної системи із зовнішнім середовищем у вигляді діелектрика з високими значеннями діелектричної проникності та втрат у ньому (рис. 16).



Конструктивно найпростішим і ефективним кінцевим навантаженням є металева відбивальна торцева стінка у коаксіальному фідері (рис. 16, а). Змінюючи відстань від останнього щілинного випромінювача до торцевої стінки можна керувати фазою відбитої хвилі у випадку нестрогих вимог до масогабаритних характеристик системи. Недоліком такого кінцевого навантаження є неможливість поглинути частину хвилі, що негативно позначиться на загальному коефіцієнті відбиття коаксіально-щілинної системи. Показано, що цей недолік усувається оптимальним сукупним вибором параметрів щілинної системи та фідеру, з урахування характеристик зовнішнього середовища.

Встановлення ідеально відбивального кінцевого навантаження у коаксіальному фідері (напівнескінченна коаксіальна лінія) дозволяє досягти коефіцієнта випромінювання поодинокого щілинного випромінювача, близького до одиниці (рис. 17, рис. 18), що неможливо у випадку узгодженого навантаження

(нескінченної коаксіальної лінії). Робочий діапазон довжин хвиль щілинного випромінювача у напівнескінченній коаксіальній лінії збільшується у порівнянні з нескінченною, та є можливість керування шириною робочої смуги за рахунок зміни відстані до кінцевого навантаження пропорційно до половини довжини хвилі в системі.



Рис. 19 Залежності $|\Gamma_{\Sigma}|^2 = f(\lambda)$, $|\Gamma_1| = f(\lambda)$ (криві 1 та 2) (а), амплітуди (б) та діаграми спрямованості (в) для решітки кільцевих щілин (криві 1-3 відповідають $\lambda = 56,5$ мм, 70 мм та 85 мм у нескінченному, а $4 - \lambda = 56,5$ мм у напівнескінченному фідері).

Коефіцієнт випромінювання багатощілинних систем у напівнескінченній коаксіальній лінії зростає у порівнянні з системами щілин у нескінченному фідері при відповідному зниженні коефіцієнта відбиття (рис. 19). Розташування ідеально відбивального кінцевого навантаження у коаксіальній лінії на різних відстанях від щілинної решітки дозволяє регулювати ширину робочої смуги довжин хвиль коаксіально-щілинної антени за коефіцієнтом випромінювання та покращити вибірковість частотної характеристики при збереженні високого коефіцієнта випромінювання. Сильний вплив зовнішньої взаємодії між випромінювальними спостерігається решіток шілинами У випадках невеликою кількістю 3 випромінювачів та тих, що випромінюють у матеріальні середовища з великими значеннями діелектричних проникностей. За цих умов спостерігається значна нерівномірність залежностей коефіцієнтів випромінювання та відбиття від робочої довжини хвилі, яка зникає при нехтуванні зовнішніми взаємними провідностями.

Таким чином, у четвертому розділі розв'язано електродинамічну задачу збудження та випромінювання електромагнітних хвиль поодинокими та системами поперечних дугових і кільцевих щілин, прорізаних в екрані коаксіальної лінії з довільним кінцевим навантаженням. Знайдено магнітне поле, збуджене цими системами всередині та зовні фідера, отримано вирази для парціальних внутрішніх і зовнішніх взаємних провідностей щілин, досліджено вплив параметрів структури на її електродинамічні характеристики, показані способи керування ними.

У Висновках наведено основні результати дисертаційної роботи.

У Додатку А наведено список публікацій здобувача за темою дисертації.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної задачі радіофізики, випромінювачів полягає v розвитку теорії магнітного типу та ïx яка багатоелементних систем, розташованих у зовнішньому провіднику коаксіальної лінії, побудові на основі інтегральних рівнянь математичних моделей для їхнього багатопараметричного дослідження й аналізу. У дисертації проведено дослідження електродинамічних характеристик наступних структур: поодинока поперечна дугова щілина, поодинока поперечна кільцева щілина, системи поперечних дугових щілин і системи поперечних кільцевих щілин, що прорізані у зовнішньому провіднику коаксіальної лінії з довільним кінцевим навантаженням. Розв'язання краєвих задач електродинаміки таких структур і визначення фізичних закономірностей збудження та випромінювання електромагнітних хвиль даними структурами складають основу для розвитку та розширенню елементної бази сучасних випромінювальних пристроїв.

1. Уперше із застосуванням методу наведених магніторушійних сил розв'язано задачу та проведено дослідження щілинних структур, прорізаних в екрані коаксіальної лінії. Визначено та проаналізовано частотно-енергетичні та частотнопросторові характеристики цих випромінювальних структур. Надано фізичну результатів. Досліджено інтерпретацію отриманих багатопараметричні випромінювальні коаксіально-щілинні структури з довільними властивостями внутрішнього та зовнішнього простору, з будь-якою кількістю випромінювачів, геометричними параметрами фідера, кожної окремої щілини, і, так само, всієї системи випромінювачів в цілому з урахуванням внутрішньої та зовнішньої взаємодії між випромінювальними елементами. Розроблено рекомендації щодо конструктивного виконання випромінювальних пристроїв на базі коаксіальнощілинних систем з необхідними електродинамічними характеристиками для потреб практики.

Достовірність отриманих результатів обґрунтована застосуванням широко апробованих на практиці методів розв'язання краєвих задач електродинаміки, узгодженням отриманих у роботі розрахункових результатів з відомими в науковій літературі дослідженнями окремих випадків таких структур і результатами власних експериментів автора.

2. Уперше показано, що розподіл електричного поля в поодинокій поперечній дуговій щілині, яка прорізана у зовнішньому провіднику коаксіальної лінії, має симетричний вигляд і з точністю не гірше 5% може бути представлений трьома непарними просторовими гармоніками. Отримано вирази для визначення діапазону довжин хвиль, при якому можлива напівхвильова апроксимація поля в щілині.

Визначено, що зовнішній радіус повинен перевищувати внутрішній не менше ніж удвічі, та отримано вирази для вибору співвідношення радіусів, при якому відбувається ефективне випромінювання електромагнітних хвиль дуговою щілиною. Встановлено, що при збільшенні довжини щілини її резонансна довжина залишається близькою до величини 0,5 λ , а робоча смуга частот розширюється. Показано, що змінюючи діелектричні проникності діелектриків всередині та зовні коаксіальної лінії, можна керувати величинами коефіцієнтів випромінювання та відбиття, резонансною довжиною хвилі та робочою смугою частот дугової щілини. Запропоновано спосіб визначення робочої довжини хвилі випромінювача за допомогою наближених формул, використовуючи усереднену діелектричну проникність при довільних значеннях діелектричних проникностей внутрішнього та зовнішнього об'ємів фідеру.

Уперше показано, що випромінювання кільцевої щілини має нерезонансний характер та її коефіцієнт випромінювання за будь-яких умов є меншим за 0,5. Діапазон довжин хвиль, де характеристики кільцевої щілини залишаються незмінними, значно перевищує діапазон дугової. Коефіцієнт відбиття кільцевої щілини при певному співвідношенні між радіусами провідників коаксіальної лінії може досягати значень, близьких до одиниці, а коефіцієнт проходження бути нижчим за один відсоток. Доведено, що підбором параметрів фідера можливо надширокосмуговий випромінювач малогабаритний створити високим 3 коефіцієнтом випромінювання та низьким коефіцієнтом відбиття, який може бути застосований для випромінювання у матеріальне середовище, у тому числі – у біологічні об'єкти. Показано, що при певному виборі величин діелектричних проникностей внутрішнього об'єму та зовнішнього простору коаксіальної лінії можливі такі співвідношення між внутрішніми та зовнішніми провідностями щілинних випромінювачів, які дозволяють отримати найбільший коефіцієнт випромінювання досліджуваної коаксіально-щілинної структури.

визначено, Уперше ЩО діапазон довжин хвиль. коефіцієнт 3. ле випромінювання зберігається на високому рівні у систем кільцевих щілин значно ширший за діапазон аналогічної системи дугових щілин. Це пояснюється нерезонансним характером випромінювання поодинокої кільцевої щілини, на відміну від резонансного характеру випромінювання поодинокої дугової щілини. малогабаритних Доведено можливість створення i широкосмугових випромінювальних структур у вигляді системи дугових або кільцевих щілин, прорізаних в екрані коаксіальних ліній. Показано, що вибір фідеру та типу випромінювачів (кільцеві або дугові щілини певної довжини по відношенню до периметру зовнішнього провідника коаксіальної лінії), дозволяє регулювати як середню робочу довжину хвилі, так і діапазон довжин хвиль.

Уперше встановлено, що діапазонні властивості системи поперечних кільцевих щілин перш за все обумовлюються особливостями решітки, а саме відстанями між щілинами, діелектричними проникностями діелектриків, що заповнюють внутрішнє та зовнішнє середовище коаксіальної лінії. Діапазон роботи системи дугових щілин у решітці з малою кількістю елементів визначається резонансною довжиною хвилі окремого випромінювача. Робочу довжину хвилі для багатоелементних систем дугових щілин в екрані коаксіальної лінії слід обирати відмінною від резонансної довжини хвилі поодинокого випромінювача, що дає можливість оптимізувати амплітудний розподіл уздовж системи й отримати прийнятну для практики діаграму спрямованості антени.

Уперше показано можливість отримання високих коефіцієнтів випромінювання багатоелементної коаксіально-щілинної системи у випадках хвиль, коротших від резонансної – в області двопроменевого режиму роботи щілинної системи.

Доведено, що під час розрахунку енергетичних характеристик, амплітуднофазового розподілу та просторових характеристик коаксіально-щілинної антени необхідно враховувати взаємодію між щілинними випромінювачами як y внутрішньому так і у зовнішньому просторах фідеру. Встановлено, що знехтувати зовнішньою взаємодією між випромінювачами можливо лише в окремих випадках за умов випромінювання електромагнітних хвиль у середовище, що має високі втрати. Значний вплив взаємодії між випромінювальними щілинами спостерігається у випадках решіток з невеликою кількістю випромінювачів, а також у випадках середовища випромінювання великими значеннями діелектричних в 3 проникностей.

Уперше показано, що змінюючи діелектричні проникності діелектриків, які заповнюють внутрішній об'єм і зовнішній простір фідеру, можливе досягнення балансу між внутрішніми та зовнішніми провідностями системи щілинних випромінювачів, що дозволяє отримати найбільший коефіцієнт випромінювання. Збільшення втрат (tg б) у навколишньому середовищі призводить до суттєвого зменшення осциляцій частотно-енергетичних кривих за рахунок ослаблення взаємних зв'язків між щілинами по зовнішньому простору, а, отже, і до збільшення робочого діапазону довжин хвиль антенної решітки. За умови, коли діелектрична проникність зовнішнього простору перевищує діелектричну проникність внутрішнього простору коаксіальної лінії, діаграма спрямованості решітки щілинних випромінювачів формує частотнонезалежну пелюстку, положення та форма якої є постійною широкій смузі частот, а напрямок залежить лише від відношення діелектричних проникностей.

Уперше запропоновано створення геометрично-неоднорідних щілинних систем (різні довжини випромінювачів, нееквідистантність розташування випромінювачів тощо) на базі коаксіальної лінії, що дозволяє істотно зменшити коефіцієнт відбиття, підвищити коефіцієнт корисної дії антени, розширити робочий діапазон довжин хвиль антенної системи при збереженні її масогабаритних параметрів, дозволяє вплинути та надати необхідної форми амплітудно-фазовому розподілу поля вздовж системи щілин для отримання необхідної діаграми спрямованості антени.

4. Уперше досліджено вплив кінцевого навантаження на електродинамічні характеристики щілинної системи в коаксіальній лінії та показано, що розміщення комплексного кінцевого навантаження із заданими параметрами в коаксіальному фідері з системами поперечних дугових або кільцевих щілин дає додаткову можливість керування характеристиками коаксіально-щілинної антени. Встановлено, що підбір величини та фази коефіцієнту відбиття кінцевого навантаження дозволяє знизити коефіцієнт відбиття щілинної системи до рівня 0,1

по полю, зменшити габарити випромінювальної системи, поліпшити узгодження коаксіально-щілинної системи із зовнішнім середовищем з високим значенням діелектричної проникності і рівнем втрат у ньому.

Доведено, що ефективним кінцевим навантаженням є металева відбивальна торцева стінка у коаксіальному фідері. Змінюючи відстань від останнього щілинного випромінювача до торцевої стінки, можна керувати фазою відбитої хвилі, аналогічно випадку керованого навантаження, якщо до масогабаритних характеристик випромінювальної системи не висуваються жорсткі вимоги під час конструювання та експлуатації. Недоліком такого кінцевого навантаження є неможливість поглинути частину хвилі, що може призводити до збільшення загального коефіцієнту відбиття коаксіально-щілинної системи. Цей недолік усувається відповідним сукупним вибором параметрів щілинної системи та фідеру, з урахуванням характеристик зовнішнього середовища.

Уперше визначено, що ідеально відбивне кінцеве навантаження у коаксіальному фідері (напівнескінченна коаксіальна лінія) дозволяє досягнути близького до одиниці коефіцієнту випромінювання поодинокого щілинного випромінювача. Високий коефіцієнт випромінювання зберігається у широкому діапазоні довжин хвиль щілинного випромінювача у напівнескінченній коаксіальній лінії та істотно збільшується у порівнянні з нескінченною. Керування шириною робочої смуги можливе за рахунок зміни відстані до кінцевого навантаження пропорційно до половини довжини хвилі в системі.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. Katrich V. A., Lyashchenko V. A., Medvedev N. V. A Slot Radiator in a Coaxial Line. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2011. Vol. 70, № 5. Р. 395–411. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v70.i5.20; Катрич В. А., Лященко В. А., Медведев Н. В. Щелевой излучатель в коаксиальной линии. *Радіофізика та електроніка*. 2010. Т. 15, № 1. С. 7–16.

2. Катрич В. А., Лященко В. А., Медведев Н. В. Коаксиально-щелевой излучателью *Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб.* 2010. Вип. 163. С. 183–190.

3. Katrich V. A., Lyashchenko V. A., Medvedev N. V. Radiation from a Slot Array in Coaxial Line Screen. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2012. Vol. 3, № 4. Р. 325– 335. DOI: 10.1615/RadioPhysicsRadioAstronomy.v3.i4.60; Катрич В. А., Лященко В. А., Медведев Н. В. Излучение из системы щелей в экране коаксиальной линии. *Радиофизика и радиоастрономия*. Харьков, 2012. Т. 17, № 2. С. 146–156.

4. Медведев Н. В. Излучение в материальную среду системы щелей в экране коаксиальной линии. Вісн. Харків. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2012. № 1038, Вип. 21. С. 11–16.

5. Катрич В. А., Лященко В. А., Медведев Н. В. Многоэлементные системы щелевых излучателей в экране полубесконечной коаксиальной линии. *Радиофизика и радиоастрономия*. Харьков, 2013. Т. 18, № 4. С. 309–322.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Катрич В. А., Лященко В. А., Медведев Н. В. Многоэлементные системы коаксиально-щелевых излучателей. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 21-й Междунар. Крым. конф. КрыМиКо'11. Севастополь, 2011. С. 545–546.

7. Катрич В. А., Лященко В. А., Медведев Н. В. Щелевой излучатель в полубесконечной коаксиальной линии. *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 22-й Междунар. Крым. конф. КрыМиКо'12.* Севастополь, 2012. С. 495–496.

8. Katrich V. A., Lyashchenko V. A., Medvedev N. V. Radiation from the transverse slot cut in a coaxial line in the lossy material medium. *UWBUSIS'6: Proceedings of 6th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals*, Sept. 2012, Sevastopol, 2012. P. 78–80. DOI: https://doi.org/10.1109/UWBUSIS.2012.6379738.

9. Katrich V. A., Lyashchenko V. A., Medvedev N. V. The Frequency-Energy and Spatial Characteristics of the Coaxial-Slot Array. *ICATT'13: Proc. on 9th Int. Conference on Antenna Theory and Techniques.* 2013, Odessa, 2013. P. 148–150. DOI: https://doi.org/10.1109/ICATT.2013.6650707.

10. Katrich V. A., Lyashchenko V. A., Medvedev N. V. The Influence of Interconnection Between the Radiators on the Energy and Directional Characteristics of Coaxial-Slot Antenna. UWBUSIS'7: Proceedings of 7th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 2014. Kharkiv, 2014. P. 71–74.

11. Katrich V. A., Lyashchenko V. A., Medvedev N. V. Energy Characteristics of the Slot System in the Screen of Coaxial Line With Controlled Termination. *ICATT'15: Proc. on 10th Int. Conference on Antenna Theory and Techniques.* 2015, Kharkiv, 2015. P. 216–218. DOI: <u>https://doi.org/10.1109/ICATT.2015.7136834</u>.

12. Katrich V. A., Lyashchenko V. A., Medvedev N. V. Electrodynamic Characteristics of Multielement Coaxial-Slot Antenna. *UWBUSIS'8: Proceedings of 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 2016.* Odessa, 2016. P. 221–224. DOI: <u>https://doi.org/10.1109/UWBUSIS.2016.7724194</u>.

13. Katrich V. A, Lyashchenko V. A., Medvedev N. V. Coaxial-Slot Antenna Array With Different Lengths of Radiators. *UkrMiCo'2016: Proceedings of 1th International Conference RadioElectronics and InfoCommunications, 2016.* Kyiv, 2016. P. 1–4. DOI: <u>https://doi.org/10.1109/UkrMiCo.2016.7739607</u>.

14. Katrich V. A., Medvedev N. V. Homogeneous and Inhomogeneous Array of Circumferential Slots in the Coaxial Line Shield. *UKRCON-2019: IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2019. Lviv, 2019. P. 172–176. DOI: https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879926.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

15. Катрич В. А., Лященко В. А., Медведев Н. В. Влияние оконечной нагрузки на энергетические характеристики систем щелей в экране коаксиальной линии. *Радиотехника: Всеукр. межвед. научн.-техн. сб.* 2015. Вип. 183. С. 97–104.

16. Катрич В. А., Лященко В. А., Медведев Н. В. Многоэлементные системы дуговых щелей в экране коаксиальной линии. *Радиофизика и радиоастрономия*. Харьков, 2016. Т. 21, № 4. С. 298–310.

17. Катрич В. А., Лященко В. А., Медведев Н. В. Многоэлементные системы кольцевых щелей в экране коаксиальной линии. *Радиофизика и радиоастрономия*. Харьков, 2017. Т. 22, № 3. С. 222–230.

18. Lyashchenko V. A., Medvedev N. V., Olefir A. V. Electromagnetic Near-Field of Circumferential Slot Cut in Coaxial Line Shield. *ICATT'17: Proceedings on 11th International Conference on Antenna Theory and Techniques, 2017.* Kyiv, 2017. P. 96–99. DOI: <u>https://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972593</u>.

19. Katrich V. A., Lyashchenko V. A., Medvedev N. V., Olefir A. V. Electromagnetic Near-Field of Arc Slot, Cut in Coaxial Line Shield. *DIPED'2017: Proc.* of 22nd Int. Seminar/Workshop Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory, 25-28 September 2017. Dnipro, 2017. P. 157–161. DOI: <u>https://doi.org/10.1109/DIPED.2017.8100586</u>.

20. Lyashchenko V., Yatsuk L., Medvedev N. Mathematical Model of Transverse Circumferential Slots in Coaxial Line Shield With Nonhomogeneous Dielectric Interior. *UWBUSIS'9: Proceedings of 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 2018.* Odessa, 2018. P. 366–371. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/UWBUSIS.2018.8520068.

АНОТАЦІЯ

Медвєдєв М. В. Збудження та випромінювання електромагнітних хвиль системою щілин, прорізаних у зовнішньому провіднику коаксіальної лінії. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата 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.

У роботі із застосуванням методів розв'язання інтегральних рівнянь (метод моментів, метод Гальоркіна, метод наведених магніторушійних сил) розв'язано низку крайових задач електродинаміки щодо збудження та випромінювання електромагнітних хвиль поодинокими та системами вузьких поперечних кільцевих і дугових щілин, прорізаних у зовнішньому провіднику навантаженої коаксіальної лінії за умови довільних геометричних параметрів фідера та випромінювачів, а також електрофізичних характеристик внутрішнього та зовнішнього об'ємів коаксіальної лінії. Дослідження проведені у багатопараметричній постановці задачі із широким діапазоном варіювання усіх геометричних та електрофізичних параметрів структур у широкому діапазоні довжин хвиль.

Встановлена можливість створення ефективного широкосмугового надмініатюрного щілинного випромінювача в екрані коаксіальної лінії та способи керування його характеристиками. Показані способи узгодження випромінювача із зовнішнім матеріальним середовищем, у тому числі з великими діелектричними проникностями та втратами. Запропоновані способи керування та поліпшення електродинамічних характеристик систем щілин у зовнішньому провіднику коаксіальної лінії шляхом створення неоднорідних лінійних щілинних решіток. Ключові слова: електромагнітне поле, крайова задача електродинаміки, амплітуда, фаза, діаграма спрямованості, коаксіальна лінія, дугова щілина, кільцева щілина, щілинна решітка, коефіцієнт відбиття, коефіцієнт випромінювання.

ABSTRACT

Medvedev M. V. Excitation and radiation of electromagnetic waves by a system of slots cut in the external conductor of a coaxial line. - Manuscript.

Thesis for candidate's degree in Physics and Mathematics by specialty 01.04.03 - Radio Physics. – V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

Several internal and external problems of electrodynamics on excitation and radiation of electromagnetic waves by a single slot and systems of narrow transversal circumferential and arc slot cut in the outer conductor of the coaxial line have been solved by induced magnetomotive forces method, Galyorkin method, and method of moments. The problems have been solved under the conditions of arbitrary geometric parameters of the feeder and radiators, the final termination of the coaxial line, and the electrophysical characteristics of the inner and outer spaces of the coaxial line.

Electromagnetic characteristics of the following structures are studied: single transversal arc slot, single transversal circumferential slot, system of transversal arc slots, and system of transversal circumferential slots, cut in the outer conductor of the coaxial line with an arbitrary end load. The research was carried out in a multiparameter formulation of the problem with a wide range of variations of all geometric and electrophysical parameters of structures in a wide range of wavelengths.

Physical laws connecting the coefficients of radiation and reflection, slot conductivity, amplitude-phase distributions of the field of the radiating aperture, and radiation patterns of these coaxial-slot structures with the sizes of slot elements, radii of feeder conductors, dielectric characteristics of inner and outer volumes, the positions of the slots in the system, and the parameters of the end-load of the cable in a wide range of wavelengths are determined.

It is shown that the range of wavelengths at the half power level of the arc slot radiation coefficient in the infinite coaxial line reaches $\Delta\lambda/\lambda_{res} = 50\% \div 60\%$, depending on the slot length.

It is established for the first time that if the resonant wavelength of the arc slot of length $l = \pi a_2$ (a_2 is the radius of the outer conductor of the coaxial cable) is in the multimode range of feeder wavelengths ($\lambda_{res} < \lambda_{H11}$), which occurs when the radii of the coaxial line ($a_2/a_1 < 2$), this leads to decreasing of the radiation coefficient and distortion of the dependence curve of the radiation coefficient on the wavelength. To avoid this effect, approximate relations connecting the radii of the coaxial line to the length of the radiator have been obtained.

Also, it is established that the nature of the radiation of a single circumferential slot in the outer conductor of an infinite coaxial line is nonresonant, so the level of the radiation coefficient cannot reach 0.5 on any conditions. It is shown that a narrow circumferential slot in the shield of a coaxial line is able to radiate efficiently at any wavelength, and its radiation coefficient is limited only by the parameters of the feeder and media.

It has been found that in the case of radiation in a material medium with high dielectric constants ($\varepsilon^e > \varepsilon^i$), the radiation pattern of the slot array has a frequency-independent main lobe whose shape and direction are constant. It is established that in certain cases of calculating the energy characteristics of the coaxial-slot system radiating into the medium with a large loss (tg $\delta \ge 0.8$), it is possible to neglect the interaction between the radiators located at distances greater than a quarter wavelength which significantly decreases the calculation time.

For the first time, a method of controlling the characteristics of a coaxial-slot antenna array is realized: the forming a system of arc slots with nonregular radiator lengths, whose radiation coefficient is more than 0.95 in a wide range of operating wavelengths ($\Delta\lambda/\lambda_{mid} = 44\%$), amplitude distribution, being constant or decreasing to both ends of the array, and the level of the side lobes of pattern does not exceed 0.15.

It has been found that in a semi-infinite coaxial line, the range of working wavelengths of a single arc slot above the level of the radiation coefficient $|\Gamma_{\Sigma}|^2 \ge 0.9$ can achieve 42%. Supertiny circumferential slot (l = 3.77 mm) in relation to the wavelength keeps a high radiation coefficient ($|\Gamma_{\Sigma}|^2 \ge 0.9$) for wavelengths from 130 mm up to 300 mm when the distance from the slot to the end wall (D_{sh}) satisfies condition $D_{sh}/\lambda_{\varepsilon} < 0.1$.

Mathematical models of coaxial-slot radiating structures and computing programs that allow a multiparametric analysis of physical properties of fields in structures of this kind, as well as identified patterns of frequency-spatial and frequency-energy characteristics of these fields are the basis for creating radiating devices of high-quality new electrodynamic characteristics.

The results of the dissertation can be applied in the creation of new or improving current wireless communication systems, including those in hard-to-reach places, detection systems, diagnostic and medical equipment, in particular, such as irradiators for interstitial hyperthermia.

Keywords: electromagnetic field, edge problem of electrodynamics, amplitude, phase, radiation pattern, coaxial line, arc slot, circumferential slot, slot array, reflection coefficient, radiation coefficient.

Відповідальний за випуск С. Л. Бердник

Підписано до друку 04.08.2021 р. Формат 60х84/16. Папір офсетний. Друк цифровий. Наклад 100 прим

Видавництво «Стильна типографія» 61002, м. Харків, вул. Чернишевська, 28А Тел.: (057) 754-49-42 e-mail: zebraprint.zakaz@gmail.com Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: серія ДК №5493 від 22.08.2017 р.