

ВІДГУК

офіційного опонента доктора фізико-математичних наук,
старшого наукового співробітника Одаренка Євгена Миколайовича
на дисертаційну роботу Музичишина Богдана Ігоровича
“Відкриті коливальні системи для ефективного підсумовування
потужностей у міліметровому діапазоні”,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань
10 — Природничі науки за спеціальністю 104 — фізика та астрономія

1. Актуальність теми виконаної роботи та зв'язок із науковими програмами, планами, темами

У дисертаційній роботі Музичишина Б.І. проведено дослідження фізичних особливостей та закономірностей збудження за допомогою зосереджених та апертурних елементів зв'язку у відкритих коливальних системах вищих аксіально-несиметричних та аксіально-симетричних типів коливань для ефективного підсумовування потужностей окремих джерел у резонансному об'ємі. Для вивчення взаємодії електромагнітного поля з речовиною, електронними потоками, біологічними об'єктами в міліметровому діапазоні довжин хвиль необхідні достатньо потужні джерела, як безперервного, так і імпульсного випромінювання. Такі джерела в зазначеному діапазоні можуть знайти застосування і в лінійних прискорювачах заряджених частинок. Крім того, наразі актуальним є завдання боротьби з безпілотними літальними апаратами. Найбільш ефективним є цілеспрямований вплив на них електромагнітного випромінювання високого рівня потужності. Найбільш дієвими будуть електромагнітні хвилі зазначеного діапазону. Вони здатні проникати в щілини екранів таких пристроїв, пошкоджуючи їх вхідні ланцюги. Для цього необхідно забезпечити в місці знаходження літального апарату високу напруженість електричного поля. На сьогодні в міліметровому діапазоні довжин хвиль таких джерел, які мали б високі рівні імпульсної вихідної потужності і порівняно невелику вагу,

не існує. Одним з можливих шляхів вирішення цього завдання є підсумовування потужностей декількох джерел у резонансному об'ємі. При цьому резонансна система повинна відповідати діапазону, в якому проводяться дослідження. Тому в якості такої системи доцільно розглядати відкритий резонатор (ВР). Доволі перспективним для підсумовування потужностей окремих джерел можна вважати застосування вищих аксіально-несиметричних і аксіально-симетричних типів коливань резонатора. У цьому випадку спрощується розташування джерел поза резонатором і збільшується ефективність збудження робочого типу коливань, оскільки елементи зв'язку на дзеркалах розташовуються в областях з максимальною напруженістю електричного поля.

Таким чином, запропоновані в дисертації дослідження мають цілеспрямований та систематизований характер вирішення низки завдань наукового та практичного спрямування.

Актуальність роботи підтверджується також тим, що обраний напрям дисертаційного дослідження пов'язаний з виконанням низки програм та науково-дослідних тем: “Нові теоретичні та експериментальні методи в електродинамічному моделюванні, генерації та випромінюванні електромагнітних хвиль гігагерцового та терагерцового діапазонів частот” (шифр “Старт-5”, 2020 р., № держреєстрації 0120U100980); “Розробка нових методів і засобів отримання інформації про фізичні характеристики природних середовищ їх структурних неоднорідностей, поверхонь розподілу та окремих об'єктів за даними дистанційного зондування і радіолокації” (шифр: “Сенсорика-3”, 2021 р., № держреєстрації 0121U100697).

Наведене вище дає підстави стверджувати, що дисертаційна робота є актуальною, відповідає сучасним запитам і потребам природничих наук і стосується нагальних проблем науки і практики.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків, сформульованих у дисертації.

Аналіз змісту дисертації, а також публікацій за темою є підставою для висновку про наукову обґрунтованість і достовірність викладених у роботі результатів, що забезпечуються як використанням апробованих методів квазіоптики та відомих чисельних методів розв'язування задач електродинаміки. Зокрема, для оцінки ефективності збудження вищих типів коливань у ВР та вищих типів хвиль у різних хвилеводах використовується метод розрахунку енергетичних характеристик антен у ближній зоні. Для вимірювання структур електричних полів вищих типів коливань, що збуджуються в резонаторах за допомогою щілинних та апертурних елементів зв'язку, застосовується метод пробного тіла.

3. Значення отриманих результатів для науки та практики.

Дисертація містить нові, раніше не захищені наукові положення. Серед них можна виділити такі:

- Вперше експериментально встановлено, що максимальний коефіцієнт підсумовування потужностей двох джерел у ВР, в якому збуджується перший вищий аксіально-несиметричний тип коливань $ТЕМ_{10q}$ за допомогою апертурних елементів зв'язку може досягати величини 0,9.
- Вперше експериментально встановлено, що при збудженні у відкритій коливальній системі типів коливань за допомогою щілинних елементів зв'язку, виконаних на криволінійному відбивачі і зміщених до периферії дзеркал більше, ніж на дві довжини хвилі, в резонаторі збуджуються аксіально-симетричні типи коливань квазі- $ТЕМ^*_{11q}$ та квазі- $ТЕМ^*_{01q}$.
- Запропоновано при дослідженні підсумовування потужностей двох джерел у ВР, в якому збуджується перший вищий аксіально-несиметричний тип коливань $ТЕМ_{10q}$, використовувати хвилевідний E -трийник. Завдяки цьому з'являється можливість використання при дослідженнях одного діода Ганна, потужність якого ділиться навпіл.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у тому,

що розгляд першого вищого аксіально-несиметричного типу коливань як робочого, який збуджується у відкритій коливальній системі за допомогою зосереджених і апертурних елементів зв'язку, дозволить складати в резонансному обсязі сигнали не тільки твердотільних, але і вакуумних джерел, зокрема, магнетронів. Це дозволить отримувати в міліметровому діапазоні компактні джерела випромінювання з досить значними рівнями потужності.

4. Оцінка змісту дисертації та її завершеність.

Підхід до структурування змісту роботи є логічним та методологічно вірним. Робота складається з анотацій, списку публікацій дисертанта, вступу, п'яти розділів із відповідними висновками до кожного з них, узагальнюючих висновків, та списку використаних джерел. Зміст роботи викладено на 173 сторінках тексту, список використаних джерел складається з 120 найменувань.

У *вступі* дисертації обґрунтовано вибір теми наукового дослідження, визначено об'єкт, предмет та мету дослідження, його завдання. У *першому розділі* дисертації висвітлено основні проблеми складання потужностей у міліметровому діапазоні. Розглянуто результати досліджень складання потужностей твердотільних джерел у ВР. Сформульовано ключові аспекти, пов'язані із проведенням цих досліджень. У *другому розділі* за допомогою хвилевідного *E*-трийника досліджувалося складання потужностей двох джерел у ВР, в якому збуджується перший вищий аксіально-несиметричний тип коливань TEM_{10q} . Максимальний коефіцієнт підсумовування потужностей двох джерел в ВР з двома щілинними елементами зв'язку дорівнює 0,719. Для отримання максимального коефіцієнта підсумовування потужностей у резонаторі повинен збуджуватись лише робочий тип коливань. *Третій розділ* присвячений підсумовуванню потужностей у ВР, що збуджується за допомогою апертурних елементів зв'язку. Максимальний коефіцієнт підсумовування потужностей двох джерел в цьому випадку дорівнює 0,9. Апертурний спосіб збудження коливань в резонаторі

забезпечує кутову селекцію спектра, на відміну від способу щілинного збудження. Це пов'язано з меншими втратами на збудження. У *четвертому розділі* показано, що обираючи певним чином геометричні розміри ВР та апертурних елементів зв'язку, можна забезпечити високу ефективність збудження першого вищого аксіально-несиметричного типу коливань на частоті других гармонік діодів Ганна. Застосування густих решіток при збудженні резонатора на частоті других гармонік діодів Ганна дозволяє суттєво збільшити навантажену добротність резонатора в режимі узгодження. В свою чергу, це дозволить збільшити коефіцієнт підсумовування потужностей діодів Ганна на частоті других гармонік. *П'ятий розділ* присвячений дослідженню напівсферичного ВР з відрізком круглого хвильоводу. З максимальною ефективністю, що дорівнює 0,955, хвиля TE_{01} збуджується у круглому хвильоводі за допомогою внутрішнього кільця плями поля виродженого аксіально-симетричного типу коливань TEM^*_{11q} . Наявність відрізка круглого надрозмірного хвильоводу в центрі одного із дзеркал ВР дозволяє суттєво розрідити спектр коливань такої резонансної системи, що має важливе практичне значення при побудові суматорів потужностей.

Одержані результати достатньо повно представлено у висновках до розділів та в узагальнюючих висновках.

Таким чином, обсяг і зміст дисертації свідчать про ретельне вивчення проблеми дослідження.

5. Повнота викладу результатів дослідження в опублікованих працях.

Основні результати, наукові положення та висновки дисертаційного дослідження опубліковано у 4 наукових публікаціях, серед яких 3 у наукових статтях, з яких 1 індексується в міжнародних наукометричних базах даних Web of Science та Scopus, 2 статті опубліковано у фаховому науковому виданні України, та 1 публікація – патент України на винахід, що пройшов кваліфікаційну експертизу. Результати досліджень також опубліковано у 3

збірниках матеріалів доповідей на міжнародних наукових конференціях.

6. Дотримання академічної доброчесності, відповідність анотації основним положенням дисертації.

Текст дисертаційної роботи, стиль подання матеріалів дає підстави стверджувати, що дослідження виконано з дотриманням загальних вимог до академічної доброчесності. Список використаних джерел на наукові праці та інші інформаційні джерела оформлено відповідним чином. Зміст анотації не містить інформацію, яка була б відсутньою у тексті дисертації. В роботі Музичишина Б.І. не виявлено ознак академічного плагіату, фальсифікації, фабрикації, компіляції тощо.

7. Дискусійні положення та зауваження до змісту роботи.

Загалом позитивно оцінюючи дисертаційне дослідження, слід зазначити певні недоліки роботи:

1. Опис багатьох результатів експериментальних та теоретичних досліджень має характер констатації фактів. Було б доцільно більше уваги приділити аналізу фізичних закономірностей процесів, що відбуваються у системі.
2. При розташуванні стрічкової дифракційної решітки в об'ємі резонатора доцільно було б описати фізику процесів, пов'язаних з фокусуванням і розфокусуванням Гауссова пучка.
3. При проведенні досліджень автор не аналізував узгодження по входу резонатора для різних періодів одновимірних дифракційних решіток. Хоча цей параметр не менш важливий, ніж резонансний коефіцієнт передачі.
4. В роботі одночасно використовуються різні системи позначень діапазонів електромагнітних хвиль. Наприклад, ВВЧ, НВЧ діапазон та Х-діапазон, S-діапазон. Краще дотримуватися однієї системи.
5. У роботі є низка невірно вжитих українських слів. Наприклад, «щілинний запит», «рідкі ґрати». Крім того, замість терміну «порушується» стосовно коливань має бути «збуджується», замість «численні дослідження» має бути «чисельні дослідження».

Висловлені зауваження дещо погіршують враження від роботи, але принципово не впливають на загальний висновок про її науковий рівень та науково-практичну значущість.

8. Загальний висновок.

Аналіз дисертаційного дослідження, його анотації та опублікованих праць за темою дисертації дозволяє зробити висновок, що дисертаційна робота на тему “Відкриті коливальні системи для ефективного підсумовування потужностей у міліметровому діапазоні” є актуальним, цілісним, самостійним та завершеним науковим дослідженням, яке має наукову новизну, теоретичне та практичне значення, відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. “Про затвердження вимог до оформлення дисертації”, п. 6 “Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року №44, а її автор — Музичишин Богдан Ігорович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 10 “Природничі науки” за спеціальністю 104 “Фізика та Астрономія”.

Офіційний опонент:

професор кафедри фізичних основ
електронної техніки
Харківського національного університету
радіоелектроніки
доктор фізико-математичних наук

Євген ОДАРЕНКО

Підпис Одаренка Є.М. засвідчую
Проректор з наукової роботи ХНУРЕ



Юрій РОМАНЕНКОВ