

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Натарова Михайла Петровича
"Радіаційні втрати та ефективність елементів зв'язку і джерел
збудження квазіоптичних відкритих резонаторів",
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата
фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – "радіофізика"

1. Актуальність дослідження та зв'язок з науковими програмами, темами.

Відкриті резонатори знайшли широке застосування в експериментальній фізиці і вимірювальній техніці електромагнітних хвиль різних діапазонів. Квазіоптичні діелектричні резонатори широко використовуються в сучасній мікрохвильовій техніці як елементи стабілізації джерел випромінювання, а також в пристроях для дослідження електрофізичних властивостей середовищ.

Незважаючи на велику кількість публікацій за результатами їхніх досліджень залишається невирішеним ціле коло завдань, пов'язаних з розробкою і застосуванням квазіоптичних резонансних систем. Для ефективного використання відкритих резонаторів в вимірювальній техніці і в якості коливальних систем твердотільних генераторів потрібно враховувати облік вплив елементів зв'язку на характеристики резонаторів. У відкритих резонаторах елементи зв'язку викликають додаткові радіаційні втрати, що пов'язано з випромінюванням енергії, яка не витрачається на збудження резонансного коливання у вільний простір (так званий «нерезонансний фон»), і з розсіюванням на елементі зв'язку поля резонансного коливання. Дослідження цих питань до останнього часу проводилися епізодично і, як правило, обмежувалися наближеними експериментальними або теоретичними оцінками. Знання про фізичні явища, пов'язаних з збудженням коливань у відкритих резонаторах і витіканням енергії з них, вкрай важливі для створення нових приладів, в яких використовують відкриті резонатори з поліпшеними характеристиками.

Усі завдання дисертації спрямовано на вирішення важливої наукової задачі сучасної радіофізики – встановлення фізичних механізмів і закономірностей радіаційних втрат енергії, ефективності елементів зв'язку та джерел збудження квазіоптичних відкритих резонаторів. Важливість проведених досліджень обумовлена як їх суто науковою цінністю, так і великим значенням для прикладних застосувань. Тому тематика дисертації Натарова М.П. є актуальною як в теоретичному, так і в прикладному плані і становить інтерес для розробників апаратури мікрохвильового, терагерцового і оптичного діапазонів хвиль.

Про актуальність, наукову та практичну значимість дисертації переконливо свідчить і те, що вона виконувалася в рамках 7 держбюджетних науководослідних робіт ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України і конкурсної НДР в рамках спільного проекту Державного фонду фундаментальних досліджень та Білоруського республіканського фонду фундаментальних досліджень, в яких здобувач брав участь як виконавець.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.

Представлені наукові положення, висновки і рекомендації, що виносяться на захист, виглядають досить обґрунтованими. Постановка дослідницького завдання виконана аргументовано і переконливо. Дисертація Натарова М.П. складається зі вступу, що містить загальну характеристику роботи, чотирьох розділів основного тексту, висновків до роботи і списку використаних джерел.

У першому розділі проведено огляд літератури з вивчення електромагнітних коливань і втрат їх енергії у відкритих резонаторах з зосередженими та розподіленими джерелами збудження і елементами зв'язку. Розглянуто відомі теоретичні та експериментальні методи досліджень радіаційних втрат пристроїв зв'язку відкритих резонаторів. Зроблено висновок про необхідність розробки нових методів вимірювань радіаційних втрат і з їх допомогою проведення дослідження відкритих резонансних структур з різними пристроями зв'язку. Потрібна розробка нових теоретичних моделей збудження відкритих резонаторів одним або багатьма джерелами і зв'язку квазіоптичних відкритих резонаторів з зовнішніми трактами.

У другому розділі запропоновано новий метод вимірювання радіаційних втрат пристроєм зв'язку відкритого резонатора з лінією передачі, що враховує випромінювання елемента зв'язку у вільний простір і випромінювання через розсіювання резонансного поля на елементі зв'язку. Метод заснований на вимірюваннях збереженої енергії резонансної моди відкритого резонатора і потужності всіх видів втрат за допомогою спеціально прокаліброваного елемента зв'язку на дзеркалі відкритого резонатора, що дозволяє визначити ефективність збудження і ефективність виведення енергії через елемент зв'язку відкритого резонатора. Вперше виміряна ефективність виведення енергії з відкритого резонатора і частка втрат енергії через розсіювання на елементі зв'язку у вигляді щілини. Експериментально показано, що ефективність виведення енергії мало залежить від ширини щілини і від поздовжнього індексу коливань.

У третьому розділі вперше запропонована наближена двовимірною модель зв'язку з хвилеводом квазіоптичного відкритого резонатора, за допомогою якої можна описати процес збудження резонатора і виведення енергії з нього. Показано, що висока ефективність збудження відкритого резонатора обумовлена тим, що поле резонансного пучка, розсіяне на елементі зв'язку, і поле випромінювання з елемента зв'язку мають протилежні фази, а поле з елемента зв'язку, що трансформується в резонансний пучок, синфазне з полем резонансного пучка. Вперше запропоновано модель збудження квазіоптичного відкритого резонатора системою електричних диполів, яка враховує нерезонансне випромінювання джерела збудження. Показано, що система джерел збуджує резонансну моду з більшою ефективністю, якщо фази високочастотних струмів збігаються з фазою коливань поля резонансної моди і якщо джерела знаходяться в полі резонансної моди.

У четвертому розділі вперше запропоновано еквівалентну схему заміщення відкритого резонатора з елементом зв'язку, що враховує як нерезонансне випромінювання при збудженні відкритого резонатора, так і розсіювання на еле-

менті зв'язку поля резонансної моди. Методом імпедансу вперше проведено вимірювання величин кожного виду втрат відкритого резонатора і елемента зв'язку в околі резонансної частоти. На підставі проведених вимірювань ефективностей збудження і виведення енергії в двохдзеркальних і в дзеркальних дискових діелектричних резонаторах елементами зв'язку у вигляді щілин і отворів вперше показано, що при однаковому коефіцієнті зв'язку щілинні елементи мають завжди більш високу ефективність, ніж отвори в діафрагмі, як при збудженні, так і при виведенні енергії.

3. Достовірність та наукова новизна отриманих результатів.

Достовірність і обґрунтованість результатів, наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в даній дисертаційній роботі, не викликає сумнівів і визначається коректністю постановки задач, а також тим, що при їх отриманні використовувалися всебічно апробовані стандартні і оригінальні експериментальні методи для дослідження випромінювання з відкритих резонаторів і вимірювання напруженості поля резонансних мод, методи експериментального моделювання мікрохвильових пристроїв. Основні експериментальні результати, отримані дисертантом, добре узгоджуються з даними, отриманими ним шляхом математичного моделювання з використанням методів теорії дифракції та розсіювання хвиль. Обґрунтованість і достовірність теоретичних результатів забезпечена використанням відомих математичних і обчислювальних моделей, коректністю прийнятих допущень, збіжністю обчислювальних процесів в шуканих рішеннях.

Наукова новизна отриманих у дисертації результатів природно впливає з актуальності й новизни вибору об'єкта досліджень, а фізично обґрунтований підхід до вибору й вирішенню необхідних для його повного вивчення завдань дозволяє автору переконливо це підтвердити.

До результатів, які мають наукову новизну, можна віднести такі:

1. Запропоновано два нових методи вимірювання радіаційних втрат і ефективності виведення енергії зосереджених елементів зв'язку квазіоптичних відкритих резонаторів.
2. Запропоновано двовимірну модель зв'язку з хвилеводом квазіоптичного відкритого резонатора зосередженим елементом зв'язку або системою джерел, яка вперше дозволила провести чисельне моделювання радіаційних втрат пристроїв зв'язку і джерел збудження.
3. Теоретичне і експериментальне дослідження умов ефективностей збудження і виведення енергії в двохдзеркальних і в дзеркальних дискових діелектричних резонаторах елементами зв'язку у вигляді щілин і отворів.

4. Завершеність і стиль викладу, повнота відображення результатів в публікаціях.

Аналіз сукупності наукових результатів і положень, характеристика яких наведена в пунктах 1-3, дозволяє зробити висновок про їх внутрішню єдність і визначити особистий внесок автора в науку. Він полягає в тому, що здобувач запропонував, математично обґрунтував і експериментально підтвердив новий

підхід для вирішення актуальної задачі сучасної радіофізики, який полягає у встановленні фізичних механізмів і закономірностей збудження, випромінювання і розсіювання електромагнітних коливань елементами зв'язку і сторонніми джерелами в відкритих резонансних системах і в оточуючому просторі. Задача розв'язана на підставі теоретичних і експериментальних досліджень фізичних процесів в квазіоптичних відкритих резонаторах двох типів: в двохдзеркальних резонаторах і в дзеркальних дискових діелектричних резонаторах з модами шепочучої галереї.

Зауважимо, що дана робота має серйозний потенціал для подальшого розвитку. Тому є досить актуальним, використовуючи запропоновані в роботі методи і підходи, створення моделей для розрахунків квазіоптичних відкритих резонаторів з різними неоднорідностями у вигляді діелектриків або активних елементів. Разом з тим, дисертація Натарова М.П. є завершеним актуальним науковим дослідженням, виконаним на високому рівні відповідно до вимог до кандидатських дисертацій.

Дисертація написана цілком зрозуміло і грамотно, науково-технічна термінологія використовується достатньо коректно, структура роботи є логічною. Основні результати опубліковані в 11 статтях у профільних наукових виданнях, три з них опубліковані в рейтингових міжнародних журналах, є 1 авторське свідоцтво на винахід. Основні положення дисертації пройшли апробацію на 4 міжнародних наукових конференціях, а також на наукових семінарах. Результати роботи повністю відображені в зазначених публікаціях. Опубліковані статті за своїм змістом не дублюють одна одну. Всі опубліковані наукові праці відповідають темі дисертації. Зміст автореферату відповідає тексту дисертації.

5. Науково-практична значимість отриманих результатів і можливі шляхи їхнього застосування.

Наукова і практична значимість результатів дисертаційної роботи Натарова М.П. полягає в тому, що отримані в ній теоретичні та експериментальні результати дозволяють розширити фізичні уявлення про закономірності та особливості збудження, випромінювання і розсіювання електромагнітних коливань елементами зв'язку і сторонніми джерелами в відкритих резонансних системах і в оточуючому просторі.

Розроблені автором методи вимірювання ефективності збудження і виведення енергії коливань елементами зв'язку дають можливість оптимізувати енергетичні характеристики коливальних систем при розробках твердотільних і електровакуумних приладів, а також покращувати характеристики вимірювальних приладів, в яких використовуються відкриті резонатори.

Дисертаційна робота представляє наукову і практичну цінність для фахівців в області обчислювальної електродинаміки, квантової радіофізики, оптоелектроніки та ін. Результати, отримані при її виконанні, можна рекомендувати для застосування в різних установах як дослідницького, так і науково-виробничого напрямків.

6. Недоліки та зауваження.

Дисертаційна робота Натарова М.П. не вільна від недоліків.

У розділі 2 автор наводить схеми вимірювань (рис. 2.4), проте в тексті дисертації аналіз цих схем відсутній. Аналізується ефективність тільки щілинних елементів зв'язку, а аналіз отворів зв'язку відсутній. Автор не дає обґрунтування ф. 2.23. Відсутнє обґрунтування величини дифракційних втрат резонансної моди (с. 65). На рис. 2.5 відсутня інформація про ширину щілин, для яких наведені ефективність збудження і навантажена добротність. Не розглянуто крайові ефекти при калібруванні додаткових елементів зв'язку.

У розділі 3 не дає обґрунтування ф. 3.27. На с. 94 для опису фазових зрушень типів коливань невдало введено термін "аргументи доданків амплітуд пучків". При аналізі результатів чисельного моделювання в підрозділі 3.2.3 автор не наводить розмір дзеркал.

У розділі 4 автор не вказує методи ідентифікації мод, які використовуються в експериментах (мода TEM_{0013} с.130, мода $EH_{39,1,1}$ с.140).

Підписи до деяких рисунків малоінформативні (рис. 2.5, 2.6, 3.4, 3.5, 3.13).

Дисертація не вільна від технічних огріхів. У розділі 2 присутнє посилання на неіснуючу формулу (1.3), с.52. У розділі 3 вводиться параметр ширини щілини (d) без його згадки в тексті дисертації.

Занадто велике число абревіатур ускладнює сприйняття матеріалу.

7. Загальні висновки.

Ці зауваження не зменшують загальну позитивну оцінку рецензованої роботи та не стосуються принципових результатів і висновків дисертації. Детальний аналіз дає змогу зробити висновок, що подана до захисту робота є завершеним дослідженням та містить важливі наукові результати.

Здобувач виконав великий обсяг цікавих і актуальних досліджень, запропонував, математично обґрунтував і експериментально підтвердив новий підхід для вирішення актуальної задачі радіофізики, який полягає у встановленні фізичних закономірностей і особливостей збудження, випромінювання і розсіювання електромагнітних коливань елементами зв'язку і сторонніми джерелами в відкритих резонансних системах і в оточуючому просторі. Дисертант отримав науково-обґрунтовані результати дослідження фізичних процесів, які супроводжують резонансні коливання електромагнітних полів в відкритих резонаторах через наявність в них елементів зв'язку та джерел збудження. Ці результати є новими і мають як наукове, так і прикладне значення для розробників елементної бази в мікрохвильовому, терагерцевому і оптичному діапазонах хвиль.

За тематикою проведених досліджень, змістом і наслідками дисертація Натарова М.П. повністю відповідає спеціальності 01.04.03 – радіофізика. Матеріали дисертації повністю опубліковані в реферованих провідних наукових журналах і були своєчасно подані на конференціях і симпозіумах, що проводилися за тематикою досліджень.

Автореферат повністю відповідає змісту дисертації. Виклад матеріалу в дисертації відповідає сучасним вимогам, вона написана чітко, хорошою науково-літературною мовою.

Оцінюючи роботу в цілому, вважаю, що за актуальністю, обсягом виконаних досліджень, новизною та науковим рівнем одержаних результатів, науково-практичною значимістю рецензована дисертаційна робота “Радіаційні втрати та ефективність елементів зв’язку і джерел збудження квазіоптичних відкритих резонаторів” відповідає вимогам, зазначених у п. 11 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567, які висуваються до кандидатських дисертацій, а її автор, Натаров Михайло Петрович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент,
доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедри квантової радіофізики
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна



В. О. Маслов

14 березня 2018 року

