

ВІДГУК

офіційного опонента кандидата фізико-математичних наук,
доцента Дегтярьова Андрія Вікторовича
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 дослідження та зв'язок з науковими програмами, темами.

На даний момент випромінювання міліметрового діапазона знаходить широке застосування у широкому колі практичних задач, зокрема, у візуалізації біологічних та медичних об'єктів, динамічній поляризації ядр для підвищення роздільної здатності ЯМР спектрометрів, високошвидкісній комунікації, сфері безпеки, матеріалознавстві та багатьох інших. У теперішній час напівпровідникові генераторні системи є дуже популярними через їх компактність та можливість широкого діапазону перестроювання, проте на жаль, не зважаючи на значний прогрес у напівпровідниковій галузі, головним недоліком даних генераторів залишаються низькі рівні потужності випромінювання у міліметровому діапазоні, особливо його короткохвильовій частині. В цей же час у зазначених діапазонах частот найбільшу потужність випромінювання мегаватного рівня мають гіротрони – електронно-вакуумні прилади сімейства мазерів на циклотронного резонансу. Однак частота випромінювання гіротронів прямопропорційна індукції магнітного поля, тому для роботи у міліметровому діапазоні прилади даного типу потребують індукції магнітних полів більше за 2 Т, що значно впливає на габарити та вагу генераторних систем. Те ж саме можна сказати і про лазери на вільних електронах, які характеризуються в міліметровому діапазоні прискорюючою напругою в сотні кВ і індукцією магнітного поля на рівні 2 Т. А це знову ж таки впливає на геометричні розміри і вагу таких генераторів. Тому у міліметровому діапазоні для отримання значних рівнів потужностей при порівняно невеликих геометричних розмірах джерел необхідно переходити до складання потужностей у резонансному обсязі. Одномодові хвилеводні резонатори матимуть малі геометричні розміри, які пропорційні робочій довжині хвилі, і, як наслідок, низьку добротність. У зв'язку з цим необхідно переходити до резонансних систем, які використовують поширення хвиль у вільному просторі – відкритих резонаторів (ВР).

Всі завдання дисертації спрямовані на вирішення важливої наукової проблеми сучасної фізики, яка стосується встановлення 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 обсязі.

Важливість проведених досліджень обумовлена як їх суто науковою цінністю, так і практичним значенням для прикладних застосувань. Тому тематика дисертації Музичишина Б.І. є актуальною як в теоретичному, так і в прикладному плані і становить великий інтерес для розробників приладів та пристроїв міліметрового діапазону.

Про актуальність і практичну значимість теми дисертації переконливо свідчить і те, що вона виконувалася в рамках двох держбюджетних науково-дослідних робіт Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, в яких здобувач брав участь як виконавець.

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

Дисертація складається зі вступу, який містить загальну характеристику роботи, п'яти розділів основного тексту, висновків до роботи і списку використаних джерел. Постановка дослідницького завдання виконана аргументовано та переконливо. Представлені в роботі наукові положення, висновки і рекомендації, що виносяться на захист, є досить обґрунтованими.

У першому розділі проведено аналіз підсумовування потужностей твердотільних джерел, які розташовані як в об'ємі резонатора, так і винесені з нього. Показано, що найбільш ефективно підсумовуються потужності джерел, які пов'язані з відкритою коливальною системою за допомогою елементів зв'язку. Як виявилось, така схема складання більш перспективна, оскільки зв'язок між окремими джерелами більш слабкий. Це визначає простоту налагоджування схеми та малу критичність до розкиду параметрів окремих елементів. У цьому розділі також встановлено, що в короткохвильовій частині міліметрового діапазону можливе ефективне складання потужностей магнетронів з використанням хвилеводних трійників.

У другому розділі дисертаційної роботи значну увагу приділено збудженню у резонаторі першого вищого аксіально-несиметричного типу коливань TEM_{10q} , який характеризується двома плямами поля робочого типу коливань на плоскому дзеркалі. У центрі кожної плями поля на дзеркалі ВР виконано щілинний елемент зв'язку. У розділі проведено дослідження щодо підсумовування потужностей двох джерел. Це стало можливим завдяки тому, що у схему експериментального стенду включено хвилеводний E - трійник. В якості задаючого генератора в схемі використовується один діод Ганна. Проаналізовано підсумовування потужностей двох діодів Ганна в напівсферичному ВР при його перебудові. Актуальність цих досліджень також пов'язана з можливістю складання потужностей у ВР на гармоніках основної частоти діодів Ганна. Це дозволить створювати компактні джерела субтерагерцевого та терагерцевого частотних діапазонів. Крім того, у цьому

розділі розглянуто вплив стрічкової H - поляризованої дифракційної решітки, що знаходиться в об'ємі ВР, на поведінку коефіцієнта підсумовування потужностей двох твердотільних джерел.

Третій розділ присвячено дослідженню збудження першого вищого аксіально-несиметричного коливання у ВР за допомогою апертурних елементів зв'язку. Один із недоліків щільного способу збудження полягає в складності створення ВР з наперед заданими значеннями коефіцієнтів відбиття або передачі. Тому основна перевага апертурного способу збудження коливань в резонаторі полягає в тому, що він дозволяє розділити функції узгодження по полю та зв'язку. Обираючи певним чином геометричні розміри елементів зв'язку, можна узгодити структури збуджуючого (хвилевідна хвиля) і робочого (тип коливань резонатора) полів. Зв'язок резонатора з хвилевідною лінією передачі регулюється параметрами одновимірних E -поляризованих дифракційних решіток, що розташовуються в розкривах апертурних елементів зв'язку. Такі елементи зв'язку через зменшення втрат на випромінювання повинні забезпечити більш високий коефіцієнт підсумовування потужностей окремих джерел у ВР. У цьому розділі такі і проаналізовано підсумовування потужностей двох джерел у резонаторі з апертурними елементами зв'язку. Дослідження проведено при різних періодах одновимірних E - поляризованих дифракційних решіток в розкривах елементів зв'язку і при перебудові ВР.

У **четвертому розділі** розглянута можливість застосування ВР з апертурним зв'язком для побудови твердотільних джерел гетеродинного випромінювання в субтерагерцевому діапазоні частот. Змінюючи параметри одновимірних E -поляризованих дифракційних решіток у розкривах таких елементів зв'язку, такий ВР можна розглядати, як суматор гармонік, з одного боку, і як диплексер (фільтр), з іншого боку. За допомогою методу парціальних хвиль оцінено резонансні втрати і значення навантажених добротностей першого вищого аксіально-несиметричного типу коливань у напівсферичному ВР на основних частотах і частотах других гармонік двох діодів Ганна.

П'ятий розділ дисертації присвячений дослідженню особливостей збудження вищої хвилі TE_{01} у відрізку круглого надрозмірного хвилевода, виконаного в центрі плоского дзеркала резонатора, за допомогою вищих аксіально-несиметричного та аксіально-симетричного коливань. Досліджено спектр коливань такої відкритої коливальної системи. Показано, що в резонаторі при певних способах збудження можуть існувати коливання, які не підпадають під відому класифікацію. Крім цього, запропонована конструкція суматору потужності на базі ВР з відрізком надрозмірного коаксіального хвилевода.

3. Наукова новизна та достовірність отриманих результатів

Наукова новизна отриманих у дисертації результатів природно впливає з актуальності й новизни вибору об'єкта досліджень, а фізично обґрунтований

підхід до вибору і рішення необхідних для його повного вивчення завдань дозволяє автору переконливо це підтвердити.

В результаті проведених досліджень отримано ряд нових і принципово важливих результатів. Серед них необхідно визначити наступні:

1. Вперше запропоновано при дослідженні підсумовування потужностей двох джерел у ВР, в якому збуджується перший вищий аксіально-несиметричний тип коливань TEM_{10q} , використовувати хвилевідний E -трийник. Завдяки цьому використовується один діод Ганна, потужність якого ділиться навпіл.
2. Вперше показано, що ефективність збудження хвилі TE_{01} у круглому хвилеводі, виконаному в центрі одного з дзеркал відкритої коливальної системи, за допомогою вищих типів коливань TEM_{30q} та TEM^*_{11q} – не велика. З максимальною ефективністю, що дорівнює 0,955, зазначена хвиля збуджується в круглому надрозмірному хвилеводі за допомогою внутрішнього кільця поля виродженого аксіально-симетричного типу коливань TEM^*_{11q} .
3. 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- TEM^*_{11q} та квазі- TEM^*_{01q} .

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 методи квазіоптики та відомі чисельні методи розв'язування задач електродинаміки, зокрема 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, застосовувався метод пробного тіла. В роботі отримано добре узгодження експериментальних результатів з числовими результатами.

Ознакою наукової новизни та достовірності отриманих результатів є також те, що результати досліджень опубліковані у фахових і міжнародному журналах, в яких всі статті проходять ретельне експертне рецензування, а також отримано патент на винахід.

4. Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях, відсутність порушень академічної доброчесності.

Дисертаційна робота Музичишина Б.І. є завершеним науковим дослідженням, виконаним на високому науковому рівні.

В ній викладено нові фізичні результати, що мають як самостійне, так і прикладне значення, оскільки ці результати в достатній мірі сприяють вирішенню важливої наукової задачі сучасної радіофізики яка стосується встановлення особливостей та закономірностей збудження у відкритих

коливальних системах вищих аксіально-несиметричних та аксіально-симетричних типів коливань для ефективного підсумовування потужностей окремих джерел у резонансному обсязі.

Дисертація написана цілком зрозуміло і грамотно, науково-технічна термінологія використовується коректно, структура роботи є логічною.

Основні наукові результати дисертації висвітлені у 7 наукових публікаціях, серед яких 3 у наукових статтях. Одна стаття індексується в міжнародних наукометричних базах даних Web of Science та Scopus, дві статті опубліковано у фаховому науковому виданні України, отримано один патент на винахід, а також у 3 збірниках матеріалів доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях Музичишина Б.І. не виявлено. Посилання на дослідження інших авторів є коректним.

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

В результаті ретельного дослідження факторів, що впливають на спектральні та енергетичні характеристики відкритих коливальних систем, було запропоновано нові конструкції суматорів потужності в міліметровому діапазоні.

Одержані в дисертаційній роботі теоретичні та експериментальні результати можуть бути використані у міліметровому діапазоні для вимірювання резонансним методом електрофізичних параметрів речовин, що мають плоску або циліндричну форми. Проведені теоретичні дослідження можуть знайти практичне застосування в радіолокації міліметрового діапазону.

Дисертаційна робота представляє наукову і практичну цінність для фахівців в області мікрохвильовий радіофізики, 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 і зауваження

Поряд з високим рівнем проведених експериментальних і теоретичних досліджень та цінністю отриманих результатів, мушу зазначити деякі недоліки і зауваження щодо дисертаційної роботи, що розглядається:

1. Становив би практичний інтерес, використовуючи описану автором методику розрахунку, оцінити з якою ефективністю в резонаторі збуджується коливання TEM_{40q} . Тим більше, що експериментальні дослідження підтвердили існування цього коливання в напівсферичному резонаторі.
2. При проведенні експериментальних досліджень з підсумовування потужностей двох джерел у відкритому резонаторі при апертурному способі

збудження робочого коливання автор не розглядав коефіцієнт відбиття від резонатора при зміні періоду одномірних дифракційних решіток. Цей параметр не менш важливий, ніж резонансний коефіцієнт передачі.

3. На наведених у дисертації експериментальних графіках автор не вказує довірчі інтервали щодо похибки вимірювань.

Дисертація не вільна від технічних огріхів. На сторінці 17 замість посилань на джерела [10-12] стоїть [Помилка! Джерело посилання не знайдено.].

Сторінка 62. Підпис до рисунка 2.13. Замість слова "...тракта" має бути "...тракту". Замість "...будуть протифазні" має бути "...будуть протифазні". Замість "...вищого аксіально-несиметричного" має бути "...вищого аксіально-несиметричного".

Сторінка 83. Замість "Тепер збуджуватимемо..." має бути "Тепер збуджуємо ...".

7. Загальні висновки

Ці зауваження не зменшують загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи і не стосуються її принципових результатів і висновків.

В роботі отримано нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності вирішують актуальну наукову задачу сучасної фізики яка стосується встановлення фізичних особливостей та закономірностей збудження за допомогою зосереджених та апертурних елементів зв'язку у відкритих коливальних системах вищих аксіально-несиметричних та аксіально-симетричних типів коливальних для ефективного підсумовування потужностей окремих джерел у резонансному обсязі.

За тематикою проведених досліджень, змістом і наслідками дисертація Музичишина Б.І. повністю відповідає спеціальності 104 – фізика та астрономія.. Матеріали дисертації повністю опубліковані в реферованих провідних наукових журналах і були своєчасно подані на конференціях і симпозиумах, що проводилися за тематикою досліджень.

Беручи до уваги усе вищесказане, вважаю, що розглянута дисертаційна робота Музичишина Богдана Ігоровича "Відкриті коливальні системи для ефективного підсумовування потужностей у міліметровому діапазоні", подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 104 – Фізика та астрономія, повністю відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017р. "Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій" (з наступними змінами) та постанови Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022р. "Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії" зі змінами, внесеними згідно з постановою Кабінету Міністрів України № 341 від 21 березня 2022 р., характеризується єдністю змісту та

послідовністю викладення, містить нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, отримані здобувачем в процесі досліджень та не має порушень академічної доброчесності і здобувач – Музичишин Богдан Ігорович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

Офіційний опонент,
доцент кафедри квантової радіофізики
факультету радіофізики, біомедичної
електроніки та комп'ютерних систем
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна, кандидат фізико-
математичних наук, доцент



Андрій ДЕГТЯРЬОВ

Підпис засвідчую
начальник відділу кадрів



Олена ГРОМИКО

Олена Громико