

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Максименко Олександр Володимирович

УДК 537.86; 537.87

**ВЗАЄМОДІЯ ГВИНТОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ З
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ПОЛЯМИ В РЕЗОНАТОРАХ ПІРОТРОНІВ
ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ**

01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Науково-виробничому комплексі «Відновлювальні джерела енергії та ресурсозберігаючі технології» (НВК ВДЕРТ) Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор, **Ткаченко Віктор Іванович**, Науково-виробничий комплекс «Відновлювальні джерела енергії та ресурсозберігаючі технології» Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, директор НВК ВДЕРТ;

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор, **Лукін Костянтин Олександрович**, Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я.Усикова НАН України, завідувач відділу Нелінійної динаміки електронних систем.

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, **Одаренко Євген Миколайович**, Харківській національний університет радіоелектроніки МОН України, професор кафедри Фізичних основ електронної техніки.

Захист відбудеться «___» _____ 2021 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.845.01 у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1.

Автореферат розіслано «___» _____ 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.845.01



Мануйленко О. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення робочої частоти вакуумних електронних приладів є однією з найактуальніших проблем сучасної фізики пучків заряджених частинок і радіофізики. Одними з найперспективніших таких приладів є гіротрони – генератори електромагнітного випромінювання, принцип роботи яких заснований на циклотронній нестійкості. Гіротрони вигідно виокремлюються серед інших генераторів електромагнітного випромінювання високою потужністю, високим ККД та відносно простою конструкцією. Так, потужність сучасних гіротронів є рекордною у різних частотних діапазонах (більш ніж 1 МВт на частоті 170 ГГц, 200 кВт на частоті 670 ГГц та 0.5 кВт на 1.3 ТГц). Існуючі одноступеневі системи рекуперації дозволяють підвищити ККД гіротронів до 70%. Відносна простота конструкції гіротронів робить їх привабливими для прикладних досліджень у невеликих дослідних центрах та в серійному виробництві. Справді, завдяки тому, що в гіротронах пучок електронів взаємодіє зі швидкими хвилями (їх фазова швидкість більша за швидкість світла) біля критичної частоти, ці прилади не потребують використання сповільнюючих систем з дрібними елементами та нечутливі до розкиду поздовжніх швидкостей пучка електронів.

Разом з перевагами терагерцових гіротронів у них існує ряд небажаних ефектів, які зменшують їх ефективність. До них відносяться вузький діапазон неперервної перебудови частоти генерації, конкуренція мод, конверсія мод, омичні втрати та ін. Слід відзначити, що вказані недоліки пов'язані між собою. Це призводить до загострення одних недоліків при боротьбі з іншими. Розглянемо основні з них.

Серед описаних вище недоліків саме вплив омичних втрат та конверсії мод на роботу гіротронів є найменш вивченим, оскільки в низькочастотних гіротронах з плавномінним профілем резонатора ці ефекти були нехтовно малими. З появою та інтенсивним розвитком терагерцових гіротронів, які часто мають різкі неоднорідності, питання того, як омичні втрати та конверсія мод будуть впливати на ефективність роботи гіротрону залишається відкритим. Зростання числа

практичних застосувань терагерцового випромінювання, побудова нових терагерцових гіротронів з неканонічними резонаторами та нові експериментальні можливості роблять **актуальними** дослідження впливу омичних втрат та конверсії мод на взаємодію гвинтових електронних пучків з електромагнітними полями в резонаторах таких гіротронів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана в Науково-виробничому комплексі «Відновлювані джерела енергії та ресурсозберігаючі технології» Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України відповідно до тематичного плану за темами: Відомчого замовлення НАН України «Розробка наукових основ підвищення ефективності застосувань нових та альтернативних енергетичних установок, перспективних матеріалів та ресурсозберігаючих технологій». Шифр теми III-1-11(ВДЕРТ) № держреєстрації 0111U009592, та «Розвиток наукових основ використання структурно складних функціональних матеріалів і середовищ в альтернативній енергетиці та ресурсозбереженні». Шифр теми III-1-16(НБК ВДЕРТ) № держреєстрації 0116U005362. Дисертант у зазначених роботах виступав у якості виконавця.

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є встановлення фізичних закономірностей взаємодії гвинтових електронних пучків з електромагнітними полями в резонаторах терагерцових гіротронів з урахуванням конверсії мод та омичних втрат. Для досягнення вказаної мети необхідно розв'язати наступні **задачі**:

1. Розробити аналітичний метод дисперсійного аналізу циліндричних резонаторів з синусоїдальним азимутальним гофром. Результати методу перевірити числовими розрахунками.

2. Дослідити вплив омичних втрат та конверсії мод на частоти та добротності резонаторів терагерцових гіротронів у холодному (без пучка) наближенні. Оцінити залежність розподілу електромагнітних полів та потоку енергії від конверсії мод.

3. Виявити в лінійному несамоузгодженому наближенні вплив конверсії мод на стартовий струм терагерцових гіротронів із самоузгодженим урахуванням омичних втрат.

4. Визначити вплив конверсії мод на стартовий струм та частоту терагерцових гіротронів у лінійному самоузгодженому наближенні із самоузгодженим урахуванням омичних втрат.

Об'єктом дослідження є електронні пучки та електромагнітні поля у резонаторах терагерцових гіротронів.

Предметом дослідження є омичні втрати та конверсія мод у резонаторах терагерцових гіротронів.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети були використані стандартні методи фізики пучків заряджених частинок, аналітичні методи теоретичної фізики та методи числового розв'язку звичайних диференціальних рівнянь. Електромагнітні властивості резонаторів терагерцових гіротронів у холодному наближенні визначались за допомогою розв'язання системи рівнянь Максвела, шляхом зведення їх до системи звичайних диференціальних рівнянь, імпедансних граничних умов, які враховують омичні втрати в стінках резонаторів та граничних умов випромінювання на кінцях резонатора; стартові струми та електромагнітні властивості резонаторів у випадку врахування пучка знаходились за допомогою розв'язання системи рівнянь Максвела та рівняння руху електронів зведенням їх до системи звичайних диференціальних рівнянь з використанням імпедансних граничних умов на бокових стінках та умов випромінювання на кінцях резонаторів; просторовим зарядом пучка та розкидом електронів пучка по радіусам і швидкостям нехтувалось.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше:

1. Проведено аналітичний аналіз дисперсійних властивостей циліндричного резонатора з синусоїдальним азимутальним гофром на основі теорії нескінченних визначників. Поблизу точок перетину гармонік числовим методом виявлено смуги непропускання.

2. Запропоновано метод, який на основі розкладу поздовжніх компонент електромагнітних полів та двох невідомих функцій, дозволяє самоузгоджено врахувати омічні втрати та конверсію мод та їх вплив на частоти, добротності, та розподіл полів резонаторів терагерцових гіротронів.

3. Узагальнено метод, що використовує розклад поперечних компонент електромагнітних полів на випадок самоузгодженого врахування омічних втрат. Встановлено, що конверсія мод призводить до формування спіральних структур електромагнітного поля у поперечному перерізі резонаторів терагерцових гіротронів.

4. Отримано вираз для стартового струму у наближенні заданого поля з урахуванням конверсії мод. Встановлено вплив конверсії мод на стартовий струм терагерцових гіротронів. Оцінено вплив точності виготовлення резонатора гіротрону з трансформацією мод на стартовий струм.

5. Одержано систему звичайних лінійних інтегро-диференціальних рівнянь, яка дозволяє отримати стартовий струм, частоту та розподіл полів самоузгодженим чином, з урахуванням конверсії мод та з самоузгодженим врахуванням омічних втрат.

Наукове та практичне значення отриманих результатів. Отримані в роботі результати можуть бути використані при подальших дослідженнях, розробках, виробництві та використанні субтерагерцових та терагерцових гіротронів. Виявлені смуги непропускання можуть бути використані в методах селекції генеруючого випромінювання терагерцових гіротронів. Коректне врахування омічних втрат та конверсії мод полегшать оптимізацію резонаторів терагерцових гіротронів та розробку методів боротьби з цими негативними явищами.

Особистий внесок здобувача. В усіх статтях за темою дисертації здобувач приймав безпосередню участь на усіх стадіях їх виконання, включаючи обговорення постановки задач, розробку та застосування теоретичних, числових та комп'ютерних методів для їх розв'язання, змістовний аналіз результатів та їх підготовку до публікації. Зокрема, виконання теоретичних розрахунків, вибір та

програмна реалізація числових методів здійснені ним самостійно. Ним також самостійно написаний текст дисертації та сформульовані нові наукові результати і висновки, що виносяться до захисту.

По матеріалам досліджень були опубліковані праці [1-16] у співавторстві. Особистий внесок здобувача в опублікованих роботах полягає в наступному. В роботах [1, 2] числовими розрахунками досліджені дисперсійні характеристики циліндричного резонатора з парною кількістю синусоїдальних азимутальних гофрів, які отримано виходячи з властивостей позитивно визначеної, обмеженої, алгебраїчної форми. Показано, що отримані числові розрахунки дисперсійних характеристик циліндричного резонатора з парним синусоїдальним азимутальним гофром співпадають з експериментальними результатами. В роботах [3, 4, 8-12] здобувачем отримана система звичайних лінійних диференціальних рівнянь другого порядку, що дозволяє в холодному наближенні та з урахуванням конверсії мод і з самоузгодженням врахуванням омічних втрат знаходити частоти, добротності та розподіл полів резонаторів терагерцових гіротронів. Обрана та програмно реалізована числова схема, що враховує як моди, що розповсюджуються, так і моди, що не розповсюджуються, та розв'язує цю систему рівнянь. В роботах [5, 13] дисертантом отримана система звичайних лінійних диференціальних рівнянь першого порядку, що дозволяє в холодному наближенні та з урахуванням конверсії мод і з самоузгодженням врахуванням омічних втрат знаходити частоти, добротності та розподіл полів резонаторів терагерцових гіротронів. Обрана та програмно реалізована числова схема, що враховує як моди, що розповсюджуються, так і моди, що не розповсюджуються, та розв'язує цю систему рівнянь. Проаналізована збіжність обох методів як відносно числа врахованих мод, так і відносно числа точок дискретизації. В роботі [6] здобувачем у холодному наближенні знайдені частота, добротності та розподіл електромагнітного поля резонатора гіротрона. В роботах [7, 14] дисертантом запропоновано метод, що дозволяє отримати аналітичний вираз для стартового струму гіротрону у випадку значної конверсії мод. В роботах [15, 16] здобувачем запропоновано метод, що дозволяє самоузгоджено обчислювати

стартові струми, частоти та розподіли полів з урахуванням конверсії мод та омічних втрат. Отримані відповідні системи рівнянь та розглянуті числові приклади. Таким чином, особистий внесок здобувача в отриманні результатів та положень дисертації, що підлягають захисту, є визначальним.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися, обговорювалися і отримали позитивну оцінку на наступних наукових конференціях, симпозіумах, форумах:

1. XVIII Международная научная конференция молодых ученых и специалистов к 105-летию Н.Н. Боголюбова (ОМУС-2014) (24-28 февраля 2014г., г. Дубна). [8];
2. XIV International Young Scientists' conference on applied physics, (11-14 Jun. 2014, Kyiv). [9];
3. 15th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (26-28 May 2014, Dnipropetrovsk). [10];
4. International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF-2015) (29 Sep.-2 Oct., 2015, Dnipropetrovsk). [11];
5. XII Міжнародна наукова конференція «Фізичні явища в твердих тілах» (1-4 грудня 2015 р, м. Харків). [12];
6. 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW) (20-24 June 2016, Kharkiv). [13];
7. XVI конференція з фізики високих енергій, ядерної фізики і прискорювачів (20-23 березня 2018 р., м. Харків). [14];
8. XVII конференція з фізики високих енергій, ядерної фізики і прискорювачів (26-29 березня 2019 р., м. Харків). [15];
9. IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) (21-25 Sep. 2020, Kharkiv). [16];

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 7 статей. З них 6 статей [1-3, 5-7] у спеціалізованих фахових наукових виданнях. Стаття [4] додатково характеризує дисертацію. Статті [1-3, 5-7] включені до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science ([1-3] - Q3, [5] - Q2, [6, 7] - Q1

за Scimago Journal & Country Rank, www.scimagojr.com), 4 статті опубліковані у спеціалізованих фахових наукових виданнях іноземних держав [3, 5-7]; 9 робіт у збірниках наукових праць, в матеріалах та тезах доповідей на наукових конференціях [8-16]. Роботи [10, 11, 13, 16] включені до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить вступ, 4 розділи основного тексту, 41 рисунок у тексті, висновки та список використаних джерел з 125 найменувань на 12 сторінках, загальний обсяг дисертації - 130 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, показано зв'язок даної роботи з науковими програмами, планами, темами, визначені мета й основні задачі дослідження, методи розв'язання цих задач, зазначені новизна та наукове і практичне значення одержаних результатів. Вказаний особистий внесок автора, висвітлені апробація роботи, публікації, її зміст і структура.

Перший розділ присвячений огляду теоретичних та експериментальних робіт з вивчення конверсії мод та омичних втрат у резонаторах терагерцових гіротронів. Проведено аналіз поточного стану зазначеної галузі досліджень та обговорені недосконалості наявних підходів, а також визначені питання, на які не дає відповіді існуюча теорія електродинамічних систем терагерцових гіротронів. Обґрунтована мотивація напрямків та сформульовані завдання досліджень, які присвячені розвитку і подоланню недоліків наявних напрацювань у цій галузі науки. Відповідям на поставлені питання і присвячені наступні розділи дисертаційної роботи.

У другому розділі досліджено дисперсійні характеристики циліндричного резонатора з ідеально провідними стінками, радіус якого описується синусоїдально-періодичною залежністю щодо азимутального кута. Зі збіжності нескінченного визначника, що є дисперсійним рівнянням циліндричного

резонатора з азимутальним синусоїдальним гофром, отримана додатно визначена обмежена алгебраїчна форма:

$$\alpha = \pm \frac{1 - \frac{x_0}{\gamma'_{m(2l_0-1),1}}}{\alpha_{m(2l_0-1)} + \beta_{m(2l_0-1)}x_0 + \delta_{m(2l_0-1)}x_0^2}, \text{ для } x_0 \geq 1, \quad (1)$$

$$\alpha = \pm \frac{1 - \frac{x_0}{\gamma'_{m(2l_0-1),1}}}{1 - \frac{x_0}{\gamma_{m(2l_0-1),1}}} \frac{1}{g_{m(2l_0-1)}}, \text{ для } 0 \leq x_0 \leq 1, \quad (2)$$

з властивостей якої отримуються дисперсійні характеристики як гладкого, так і гофрованого резонатора. На основі отриманої алгебраїчної форми досліджені дисперсії перших гармонік гофрованого резонатора з парною кількістю гофрів. Результати досліджень порівнювались як з наявними теоретичними та експериментальними даними, так і з власними числовими розрахунками. Показано, що дисперсійне рівняння є симетричним відносно знака глибини гофра. Знайдено, що для даного азимутального числа m , в околі точок перетину гармонік $l_0 + 1$ з дзеркальними гармоніками l_0 виникають смуги непропускання (рис. 1). Ширина смуги непропускання залежить від глибини гофра як $\alpha^{K-1}(\alpha_{l_0 m}^*)$, де $\alpha_{l_0 m}^*$ - ордината точки перетину гармонік l_0 і $l_0 + K$, $K = 1, 2, 3, \dots$ - різниця гармонік.

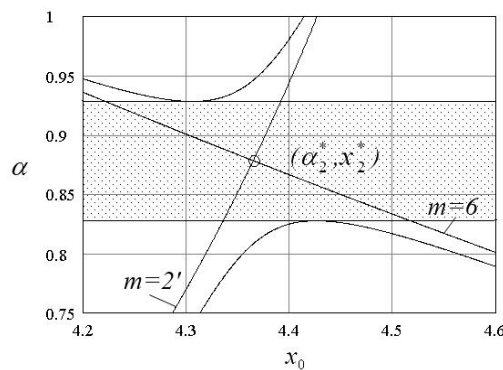


Рис. 1. Смуга непропускання (заштрихована область) в околі точки перетину дисперсійних кривих $m=2'$ і $m=6$ з координатами $\alpha_2^* = 0.878$ та $x_2^* = 4.366$.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [1,2].

У третьому розділі викладені ефективні методи холодного аналізу поздовжньо неоднорідних відкритих хвильоводів з імпедансними стінками, які моделюють резонатори гіротронів. Використовуючи розроблені методи, детально досліджено вплив конверсії мод та омичних втрат на резонансні частоти, добротності та розподіли електромагнітних полів терагерцових гіротронів у холодному наближенні. Перший метод, який базується на розкладах поздовжніх компонент електромагнітного поля, еквівалентно зводить рівняння Максвела до системи звичайних диференціальних рівнянь другого порядку:

$$(\hat{L}_1^2 A)_i + p_i^2 A_i + I_i^A = 0, \quad (3)$$

$$(\hat{L}_2^2 B)_i + q_i^2 B_i - I_i^B = 0, \quad (4)$$

$$a_0 A'_0 + b_0 A_0 + c_0 B'_0 + d_0 B_0 = \sum_{i=1}^{\infty} \left(a_i (\hat{F}_1 A)_i + d_1 \left(b_i (\hat{L}_2^2 B)_i + c_i B_i \right) \right), \quad (5)$$

$$B''_0 + d_2 B_0 = \sum_{i=1}^{\infty} \left(a_i (\hat{F}_2 A)_i + b_i (\hat{G} \hat{L}_2^2 B)_i + c_i (\hat{G} B)_i \right), \quad (6)$$

Запропонований метод самоузгоджено враховує омичні втрати, конверсію мод, має меншу, порівняно з аналогічними методами, кількість рівнянь та кращу збіжність. З метою демонстрації ефективності методу, розглянуто числовий приклад резонатора терагерцового гіротрона FU CW III, розробленого в університеті м. Фукуї (Японія). Показано збіжність запропонованого підходу відносно кількості врахованих мод та кількості точок дискретизації.

Другий метод, який базується на розкладах поперечних компонент електромагнітного поля, узагальнює добре відомі телеграфні рівняння на випадок імпедансних хвильоводів.

$$\frac{d}{dz} V_k = \sum_i T_{ki} V_i + \sum_i \tilde{T}_{ki} I_i + \tilde{\Delta}_k V_0, \quad (7)$$

$$\frac{d}{dz} I_k = \sum_i T_{ki} I_i + \Gamma_k V_k + \tilde{\Gamma}_k V_0, \quad (8)$$

$$p \frac{d}{dz} V_0 + a V_0 - b \sum_i I_i x_i + l \sum_i V_i w_i - (q + pR') \sum_i \left((a_i - k_0^2 b_i) V_i - b_i (\hat{L}^2 V)_i \right) = 0. \quad (9)$$

Як і перший метод, він самоузгоджено враховує омичні втрати, конверсію мод та на відміну від нього, дозволяє простіше враховувати електронний пучок. Числові результати обох методів були порівняні між собою на прикладі резонатора гіротрону університету м. Фукуї (Японія). Це дозволило підтвердити їх ефективність, виявити спільне та відмінне. Для робочої моди на другій циклотронній гармоніці та конкуруючої моди на першій циклотронній гармоніці розраховані резонансні частоти, добротності та розподіл полів. Виявлено, що для робочої та конкуруючої мод, конверсія мод у вихідній секції резонатора гіротрону змінює дифракційні втрати та просторовий розподіл потужності вихідного випромінювання. Ці зміни можуть впливати на взаємодію пучка із хвилями резонатора та ефективність перетворення вихідної моди. Тому їх слід ретельно враховувати при розробці та оптимізації терагерцових гіротронів. Результати багатомодових розрахунків показують, наскільки можна довіряти різним одномодовим наближенням, які ігнорують конверсію мод і враховують омичні втрати з різним ступенем самоузгодженості.

Порівняння результатів запропонованих підходів показало їх добру узгодженість, а відносно невелику різницю можна пояснити числовими похибками. Так, метод на основі розкладів поздовжніх компонент електромагнітного поля використовує скалярні базисні функції, які зазвичай збігаються швидше, ніж векторні, також цей метод містить менше невідомих функцій і дозволяє врахувати більше точок дискретизації. Цей висновок підтверджується слабкими осциляціями амплітуд у методі на основі розкладів поперечних компонент електромагнітного поля.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [3-5] і доповідалися на конференціях [8-13].

У четвертому розділі в наближенні заданого (холодного) поля була отримана узагальнена формула для стартових струмів власних мод, які збуджуються в резонаторі гіротрону з конверсією мод електронним пучком.

$$I_{st} = -\frac{I_A}{2Q} \frac{\omega_{c0}^2}{\pi c^2 \beta_{\perp 0}^4 F^2 B_0^2} \frac{\int_0^{\zeta_{out}} \left(\sum_{i=1}^{N_m} |V_i|^2 - \beta_{z0} \operatorname{Re} \left(\sum_{i=1}^{N_m} V_i I_i^* \right) \right) d\zeta}{\left(n + \frac{\partial}{\partial \Delta} \right) \left| \int_0^{\zeta_{out}} f(\zeta) \exp(-i\Delta \zeta) d\zeta \right|^2} \quad (10)$$

За допомогою даної формули вперше досліджено вплив конверсії мод на стартові струми гіротронів з резонаторами, які мають плавні та різкі переходи. Для останнього було досліджено таке важливе питання як вплив точності виготовлення резонатора на стартовий струм. Показано, що похибка в існуючих на даний час технологіях виготовлення резонаторів з трансформацією мод істотно впливає як на розподіл холодних полів, так і на стартовий струм. Показано, що вплив конверсії мод посилюється з ростом аксіального числа власної моди резонатора. Основною причиною цього є різниця між гарячими та холодними дифракційними втратами, які більш помітно сприяють загальним втратам резонатора для аксіальних мод вищого порядку. Однак, для мод високого порядку наближення заданого поля не виконується. Також отримана формула не дає значень стартового струму для магнітних полів, які відповідають ділянкам між аксіальними резонансами. Для усунення цих недоліків розроблена самоузгоджена лінійна теорія взаємодії пучка із хвилею для резонаторів гіротронів з конверсією мод та омічними втратами. Отримана система лінеаризованих інтегро-диференціальних рівнянь для оцінки порогу коливань (стартового струму).

$$\frac{d}{dz} V_k = \sum_i T_{ki} V_i + \sum_i \tilde{T}_{ki} I_i + \tilde{\Delta}_k V_0 - \frac{4\pi}{i\omega A} \int_{S(z)} j_{z\omega} \nabla_{\perp} \cdot \mathbf{e}_k^* dS, \quad (11)$$

$$\frac{d}{dz} I_k = \sum_i T_{ki} I_i + \Gamma_k V_k + \tilde{\Gamma}_k V_0 - \frac{4\pi}{cA} \int_{S(z)} \mathbf{j}_{\perp\omega} \cdot \mathbf{e}_k^* dS, \quad (12)$$

$$p \frac{d}{dz} V_0 + a V_0 - b \sum_i I_i x_i + l \sum_i V_i w_i - (q + pR') \sum_i \left((a_i - k_0^2 b_i) V_i - b_i (\hat{L}^2 V)_i \right) = 0 \quad (13)$$

$$\int_{S(z)} j_{z\omega} \nabla_{\perp} \cdot \mathbf{e}_k^* dS = -\frac{\beta_k^{n+2} G J_{m-n}(\beta_k r_b)}{\omega_{c0} M_k} g(z), \quad \int_{S(z)} j_{z\omega} \nabla_{\perp} \cdot \mathbf{e}_k''^* dS = 0 \quad (14)$$

$$\int_{S(z)} \mathbf{j}_{\perp\omega} \mathbf{e}_k'^* dS = \frac{nk_0 \beta_k^n c G J_{m-n}(\beta_k r_b)}{\beta_{z0} M_k} g(z), \quad \int_{S(z)} \mathbf{j}_{\perp\omega} \mathbf{e}_k''^* dS = -\frac{ink_0 \alpha_k^n G J_{m-n}(\alpha_k r_b)}{\beta_{z0} N_k} g(z) \quad (15)$$

Разом з граничними умовами ці рівняння визначають структуру поля, стартові струми та частоти мод резонатора. Даний метод вперше, окрім конверсії мод, дозволив врахувати вплив омічних втрат та електронного пучка самоузгодженим чином. Традиційний шлях знаходження стартових параметрів гіротрону має справу лише з обмеженими амплітудами поля резонатора та обмеженою кількістю електронів пучка. Вказані недоліки відсутні у запропонованому підході. Для гіротрона FU CW III, циліндричний резонатор якого характеризується великим кутом нахилу ($22,3^\circ$) вихідної секції, було встановлено, що конверсія мод змінює структуру поля робочої моди в цій секції резонатора, аналогічно результатам розділу 3. У той же час показано, що цей ефект не має серйозних наслідків для стартового струму та частоти робочої моди.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [6, 7] і доповідалися на конференціях [14-16].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливе наукове завдання - встановлено основні фізичні закономірності взаємодії гвинтових електронних пучків з електромагнітними полями в резонаторах терагерцових гіротронів з урахуванням конверсії мод та омічних втрат. Основні результати, отримані в дисертації, полягають у наступному.

1. Вперше розробленим аналітичним методом та числовими методами аналізу синусоїдально гофрованого резонатора показано, що для даного азимутального числа в околі точок перетину гармонік з дзеркальними гармоніками виникають смуги непропускання.
2. Вперше розробленими методами аналізу власних коливань резонаторів терагерцових гіротронів встановлено похибку різних одномодових

наближень, які ігнорують конверсію мод і враховують омичні втрати з різним ступенем самоузгодженості. На прикладі резонатора гіротрону FU CW III (університет м. Фукуї, Японія) показано, що найбільшими за амплітудою є паразитні моди ТЕ поляризації та радіальним індексом, ближчим до радіального індексу робочої моди.

3. Вперше показано, що конверсія мод власних коливань резонатора гіротрону призводить до утворення спіралеподібних структур електромагнітного поля.
4. Вперше, використовуючи отриману узагальнену формулу стартового струму, виявлено відсутність впливу конверсії власних мод резонатора гіротрону FU CW III на його стартовий струм.
5. Вперше, за допомогою отриманої узагальненої формули для стартового струму, встановлено його збільшення у два рази та зміщення по магнітному полю на 0.02 Т внаслідок похибки у виготовленні резонатора гіротрону з трансформацією мод.
6. Вперше розробленою самоузгодженою лінійною теорією було встановлено відсутність впливу конверсії мод, які збуджуються пучком, на стартовий струм і частоту гіротрону FU CW III. Разом з тим показано значний вплив конверсії мод на розподіл полів у вихідному перерізі резонатора гіротрону FU CW III, а саме, утворення спіралеподібних структур електромагнітного поля.

Таким чином, отримані результати дисертаційного дослідження дають змогу розробити радіаційно-пучкові технологічні комплекси на основі гіротронів терагерцового діапазону з підвищеними селективними властивостями, що необхідно при проведенні спектроскопічних досліджень та оптимізувати параметри вже існуючих гіротронів, зокрема гіротрону FU CW III.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Maksimenko A. V., Tkachenko V. I., Tkachenko I. V. A dispersion equation of the cylindrical ideal wall vacuum cavity sinusoidally corrugated in azimuthal direction. Part I. A physically based method obtaining of the dispersion equation // Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations». 2017. № 6. P. 28-33.
2. Maksimenko A. V., Tkachenko V. I., Tkachenko I. V. A dispersion equation of the cylindrical ideal wall vacuum cavity sinusoidally corrugated in azimuthal direction. Part II. Investigation of the dispersion equation // Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations». 2018. № 3. P. 38-41.
3. Maksimenko A.V., Zaginaylov G.I., Shcherbinin V.I. On the theory of longitudinally inhomogeneous waveguides with impedance walls // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2015. V. 12. №. 2. P. 362-370.
4. Maksimenko O.V., Zaginaylov G.I., Khizhnyak S.N. Efficient method for analysis of mode conversion and ohmic losses in terahertz gyrotrons // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kiev, Series: Radiophysics and Electronics. 2015. V. 23. № 1. P. 49-54.
5. Maksimenko A.V., Shcherbinin V.I., Tkachenko V.I. Coupled-mode theory of an irregular waveguide with impedance walls // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2019. V. 40. № 6. P. 620-636.
6. Maksimenko A.V., Shcherbinin V.I., Hlushchenko A.V., Tkachenko V.I. Effect of cavity ohmic losses on efficiency of low-power terahertz gyrotron // IEEE Transaction on Electron Devices. 2017. V. 64. № 9. P. 3898-3903.
7. Maksimenko A.V., Shcherbinin V.I., Hlushchenko A.V., Tkachenko V.I., Avramidis K.A., Jelonnek J. Starting currents for eigenmodes of a gyrotron cavity with mode conversion // IEEE Transaction on Electron Devices. 2019. V. 66. № 3. P. 1552-1558.

8. Максименко А.В., Загинайлов Г.И., Щербинин В.И. К теории продольно-неоднородных волноводов с импедансными стенками // Материалы XVIII Международной научной конференции молодых ученых и специалистов к 105-летию Н.Н. Боголюбова (ОМУС-2014) (24-28 февраля 2014г., г. Дубна). Дубна. 2014. С. 33-37.
9. Maksimenko O.V., Zaginaylov G.I. Mode conversion and ohmic losses in terahertz gyrotrons // Materials of XIV international young scientists' conference on applied physics (11-14 June 2014, Kyiv). Kyiv. 2014. P. 8.
10. Maksimenko A.V., Zaginaylov G.I., Shcherbinin V.I., Schunemann K. Theory of irregular impedance waveguides: generalized method of separation of variables // Materials of 15th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (26-28 Aug. 2014, Dnipropetrovsk). Dnipropetrovsk. 2014. P. 31-35.
11. Maksimenko A.V., Zaginaylov G.I., Shcherbinin V.I., Schuneman K. Influence of mode conversion and ohmic losses on electromagnetic properties of THz gyrotron cavities // Materials of International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF-2015) (29 Sep.-2 Oct., 2015, Dnipropetrovsk). Dnipropetrovsk. 2015. Paper ID MTE-6-en (4 p.).
12. Максименко О.В., Загинайлов Г.И., Щербинин В.И. Оптимізація профілю резонатора терагерцового гіротрону з урахуванням конверсії мод та омичних втрат. // Матеріали XII Міжнародної наукової конференції «Фізичні явища в твердих тілах» (1-4 грудня 2015 р., м. Харків). Харків, 2015. С. 154.
13. Maksimenko A.V., Zaginaylov G.I., Schuneman K. Coupled mode theory for longitudinally inhomogeneous impedance waveguides // Materials of 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW) (20-24 June 2016, Kharkiv), Kharkiv, 2016. P. 20.
14. Максименко О.В., Щербинин В.И., Глущенко А.В., Ткаченко В.И. Стартові струми резонатора гіротрону з урахуванням конверсії мод // Матеріали XVI

наукової конференції з фізики високих енергій, ядерної фізики і прискорювачів (20-23 березня 2018 р., м. Харків). Харків, 2018. С. 99.

15.Максименко О.В., Щербінін В.І., Ткаченко В.І. Самоузгоджений аналіз резонаторів гіротронів з конверсією мод // Матеріали XVII наукової конференції з фізики високих енергій, ядерної фізики і прискорювачів (26-29 березня 2019 р., м. Харків). Харків, 2019. С. 76-77.

16.Maksimenko A.V., Shcherbinin V.I., Tkachenko V.I. Linear theory of beam-wave interaction in gyrotron cavities with mode conversion. // Materials of IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW) (21-25 Sep. 2020, Kharkiv), Kharkiv, 2020. P. 929-932.

ABSTRACT

Maksimenko O.V. «Interaction of helical electron beams with electromagnetic fields in gyrotron resonators in the terahertz range». – Manuscript.

Thesis for the scientific degree of the candidate of physical and mathematical sciences by specialty 01.04.20 – physics of charged particles beams. – National Scientific Center «Kharkov Institute of Physics and Technology» NAS of Ukraine. – Kharkiv, 2021.

The studies consider the interaction of helical electron beams with electromagnetic fields in gyrotron resonators in the terahertz range. For a resonator with perfectly conducting walls, the radius of which is described by a sinusoidal-periodic dependence with respect to the azimuthal angle, it was shown for the first time by analytical and numerical calculations that non-transmission bands, in which there are no resonator vibrations, appear near the intersection points of neighboring harmonics.

To determine the parameters of a gyrotron without taking into account the effect of the beam, it was first proposed to apply the decomposition of the longitudinal components of electromagnetic fields under conditions of the significant mode conversion and ohmic losses. To make it possible to account for the electron beam, the

well-known method based on the decomposition of the transverse components of electromagnetic fields in the case of significant ohmic losses was generalized. Using this method, a generalized starting current formula was obtained for the first time in the case of the significant mode conversion in the approximation of a given field. For self-consistent accounting of an electron beam, a method that reduces the equations of motion and the equations of electromagnetic fields to a spectral task was developed.

The conducted studies are based on modern methods of gyrotron electrodynamics, which take into account mode conversion and ohmic losses. The results obtained will be useful for further theoretical and experimental studies of subterahertz and terahertz gyrotrons.

Keywords: gyrotrons, terahertz radiation, mode conversion, ohmic losses, beam-wave interaction, impedance boundary conditions, self-consistent approach.

АНОТАЦІЯ

Максименко О.В. Взаємодія гвинтових електронних пучків з електромагнітними полями в резонаторах гіротронів терагерцового діапазону. – Рукопис.

Дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок. – Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків, 2021.

В дослідженнях розглянуто взаємодію гвинтових електронних пучків з електромагнітними полями в резонаторах гіротронів терагерцового діапазону. Для резонатора з ідеально провідними стінками, радіус якого описується синусоїдально-періодичною залежністю відносно азимутального кута, вперше аналітичним шляхом та числовими розрахунками було показано, що поблизу точок перетину сусідніх гармонік з'являються смуги непропускання, в яких коливання резонатора відсутні.

Для визначення параметрів гіротрону без урахування впливу пучка вперше було запропоновано застосовувати розклад позовжніх компонент електромагнітних полів в умовах значної конверсії мод та омічних втрат. Для можливості врахування пучка електронів було узагальнено добре відомий метод на основі розкладів поперечних компонент електромагнітних полів на випадок значних омічних втрат. Використовуючи цей метод, вперше була отримана узагальнена формула стартового струму на випадок значної конверсії мод у наближенні заданого поля. Для самоузгодженого врахування пучка електронів був розроблений метод, який зводить рівняння руху та рівняння електромагнітних полів до спектральної задачі.

Проведені дослідження базуються на сучасних методах електродинаміки гіротронів, які враховують конверсію мод та омічні втрати. Отримані результати будуть корисні для подальшого теоретичного та експериментального дослідження субтерагерцових та терагерцових гіротронів.

Ключові слова: гіротрони, терагерцове випромінювання, конверсія мод, омічні втрати, взаємодія пучок-хвиля, імпедансні граничні умови, самоузгоджений підхід.

АННОТАЦІЯ

Максименко А.В. Взаимодействие винтовых электронных пучков с электромагнитными полями в резонаторах гиротронов терагерцового диапазона. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц. – Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, Харьков, 2021.

Данная диссертационная работа посвящена исследованию взаимодействия винтовых электронных пучков с электромагнитными полями в резонаторах

терагерцовых гиротронов. В качестве первого шага было рассмотрено дисперсионное уравнение цилиндрического резонатора с идеально проводящими стенками, радиус которого описывается синусоидально-периодической зависимостью относительно азимутального угла. Используя теорию бесконечных определителей, впервые аналитическим путем было показано, что вблизи точек пересечения соседних гармоник появляются полосы непропускания, в которых колебания резонатора отсутствуют. Это было подтверждено и численными расчетами. Для более точного анализа электромагнитных полей в резонаторах современных терагерцовых гиротронов был разработан подход, обобщающий традиционную систему уравнений гиротрона на случай значительных омических и дифракционных потерь. Холодными параметрами гиротрона считаются такие их значения, которые можно получить без учета влияния электронного пучка. Для их определения впервые было предложено применять разложения продольных компонент электромагнитных полей. Это позволило уменьшить количество уравнений подхода и увеличить скорость его сходимости по сравнению с существующими методами. Корректный самосогласованный учет омических потерь в стенках резонатора позволил проверить часто используемую оценочную формулу для омической добротности и точно смоделировать влияние омических потерь на собственные частоты, добротности и распределение электромагнитных полей. Однако, такой подход имеет недостаток - при учете пучка электронов, его система уравнений значительно усложняется и теряются все его преимущества. Исходя из этого, был обобщен хорошо известный подход на основе разложений поперечных компонент электромагнитных полей на случай значительных омических потерь. Используя этот подход, впервые была получена обобщенная формула стартового тока в случае значительной конверсии мод в приближении фиксированного поля. Эта формула впервые позволила определить влияние конверсии мод на стартовый ток в резонаторе гиротрона с большим выходным углом и резонаторе гиротрона с трансформацией мод. Был исследован такой важный вопрос как влияние точности изготовления резонатора на стартовый ток гиротрона с трансформацией мод. Преимуществом такой формулы является

скорость получения ответа, что необходимо при оптимизации параметров гиротронов и получении первого приближения для более точных методов. Однако данная формула игнорирует влияние пучка на распределение электромагнитных полей, не может применяться на всем диапазоне магнитных полей и ее точность ухудшается с увеличением аксиального числа. Как следствие, возникает необходимость рассматривать взаимодействие пучка электронов с электромагнитными полями самосогласованным образом. Традиционный подход, который заключается в совместном решении уравнений движения электронов пучка и уравнения возбуждения электромагнитных полей, допускает такое рассмотрение только в одномодовом приближении. Его обобщение на случай значительной конверсии мод сталкивается с проблемой разного типа задач для уравнений движения электронов пучка и уравнений для электромагнитных полей. Это начальная и краевая задачи, соответственно. Также он не учитывает омических потерь или учитывает их методом возмущений. Для решения этого вопроса был разработан подход, который сводит уравнения движения и уравнения электромагнитных полей к спектральной задаче. Ее собственными значениями выступают частота вынужденных колебаний электромагнитных полей и стартовый ток. Поскольку для уравнений электромагнитных полей использовался наш подход на основе разложений поперечных компонент, то все его преимущества сохранились в этой спектральной задаче. А именно, возможность учета как распространяющихся, так и нераспространяющихся мод любой поляризации, учета омических потерь самосогласованным образом. Отдельным преимуществом этого метода стала независимость решения задачи от числа электронов в пучке. Благодаря этому подходу впервые было оценено влияние конверсии мод на стартовые токи, частоты и распределение электромагнитных полей на всем диапазоне значений внешнего магнитного поля. Было обнаружено, что конверсия мод слабо влияет на стартовый ток резонатора гиротрона с большим выходным углом, однако существенно изменяет распределение его электромагнитных полей в выходном поперечном сечении.

Проведенные исследования основываются на современных методах электродинамики гиротронов, которые учитывают конверсию мод и омические потери. Полученные результаты будут полезны для дальнейшего теоретического и экспериментального исследования субтерагерцовых и терагерцовых гиротронов.

Ключевые слова: гиротроны, терагерцовое излучение, конверсия мод, омические потери, взаимодействие пучок-волна, импедансные граничные условия, самосогласованный подход.