

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

Ткачова Тетяна Іванівна

УДК 537.86, 537.87

**ЕЛЕКТРОННО-ХВИЛЬОВА ВЗАЄМОДІЯ В МЕТАЛЕВИХ
РЕЗОНАТОРАХ З ПОЗДОВЖНИМИ ГОФРАМИ ДЛЯ ГІРОТРОНІВ НА
ДРУГІЙ ЦИКЛОТРОННІЙ ГАРМОНІЦІ**

01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана 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**, НВК ВДЕРТ Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, провідний науковий співробітник

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

доктор фізико-математичних наук, професор, **Пономарьов Олександр Георгійович**, Інститут прикладної фізики НАН України, завідувач відділу Фізики пучків заряджених частинок.

Захист відбудеться «___» _____ 2025 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.845.01 Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1.

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

Автореферат розісланий «___» _____ 2025 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.845.01 _____ Мануйленко О. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогоднішній день терагерцове (ТГц) випромінювання в діапазоні частот від 0.3 до 3 ТГц є предметом активних теоретичних і експериментальних досліджень у всьому світі. Такий інтерес зумовлений низкою особливостей терагерцових хвиль. По-перше, ТГц хвилі здатні проходити через матеріали, які є непрозорими у видимому та інфрачервоному спектрах. При цьому вони дозволяють отримувати зображення досліджуваних зразків із кращою роздільною здатністю, у порівнянні із мікрохвильовим випромінюванням. По-друге, терагерцове випромінювання є безпечним та неіонізуючим, на відміну від рентгенівських хвиль. По-третє, за допомогою терагерцових хвиль можна отримати унікальну інформацію про структуру та хімічний склад багатьох молекул, обертальні і вібраційні частоти яких лежать в терагерцовому діапазоні частот. Такі особливості терагерцових хвиль визначають основні напрямки їх використання. Сфери застосування ТГц хвиль включають в себе високороздільну спектроскопію, виявлення прихованої зброї, вибухових речовин і радіоактивних матеріалів, хімічне зондування, контроль якості матеріалів, медичну томографію і діагностику, високошвидкісний супутниковий зв'язок, атмосферні і космічні дослідження та багато іншого.

Найбільш потужним джерелом неперервного когерентного випромінювання в субтерагерцовому діапазоні частот від 0.3 до 1 ТГц є гіротрон, принцип роботи якого заснований на вимушеному випромінюванні електронів, що обертаються в однорідному сталому магнітному полі. Його частота пропорційна циклотронній частоті електронів пучка і, як наслідок, є обмеженою через обмеженість магнітних полів, які здатні створювати сучасні надпровідні магніти. У зв'язку з цим, особливий інтерес представляють гіротрони на другій (та більш високих) гармоніках циклотронної частоти, в яких необхідне магнітне поле може бути зменшено в два (та більше) рази. Їх практична реалізація, однак, часто пов'язана з проблемою конкуренції робочої моди гіротрона з модами на першій (фундаментальній) циклотронній гармоніці. Така проблема загострюється зі зростанням номера циклотронної гармоніки і може призвести до скорочення області генерації робочої моди, а також зниження ККД і вихідної потужності гіротрона. Це призводить до необхідності розробки вдосконалених типів резонаторів, які забезпечують селективне придушення конкуруючих мод у гіротронах на вищих циклотронних гармоніках.

Одним з представників вдосконалених резонаторів може бути циліндричний резонатор гіротрона, що має металеву поверхню з поздовжніми гофрами. Така гофрована поверхня є частотно-селективною і тому має різний вплив на моди, що збуджуються на різних гармоніках циклотронної частоти. Ця особливість гофрованої поверхні може бути використана для селекції мод та пояснює важливість та актуальність розробки гофрованих резонаторів для гіротронів на вищих циклотронних гармоніках. Темою досліджень є детальне вивчення електронно-хвильової взаємодії у резонаторах з поздовжніми гофрами з метою визначення параметрів гофрів, що забезпечують найбільш ефективне селективне придушення

фундаментальних конкуруючих мод у резонаторах гіротронів на другій гармоніці циклотронної частоти.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати, що становлять основу дисертаційної роботи, отримані в ННЦ «ХФТІ» НАН України в рамках виконання планових бюджетних науково-дослідних робіт: «Розвиток наукових основ використання структурно складних функціональних матеріалів і середовищ у альтернативній енергетиці та ресурсозбереженні» Програми робіт з атомної науки і техніки ННЦ «ХФТІ» (термін виконання 2016-2020 рр., шифр теми III-1-16 (НВК ВДЕРТ), № держреєстрації 0116U005362), «Дослідження і розробки ресурсозберігаючих пристроїв і процесів створення та удосконалення властивостей інноваційних функціональних матеріалів відновлюваної, нетрадиційної та атомної енергетики нового покоління» Програми робіт з атомної науки і техніки ННЦ «ХФТІ» (термін виконання 2021-2025 рр., шифр теми III-25-21 (НВК ВДЕРТ), № держреєстрації 0121U107860), у рамках проєкту НДР молодих учених НАН України «Оптимізація циліндричного резонатора з розподіленими поздовжніми гофрами для терагерцового гіротрона на другій гармоніці циклотронної частоти» (термін виконання 2017-2018 рр., № держреєстрації 0117U001668) та у рамках гранту НАН України дослідницьким лабораторіям/групам молодих вчених НАН України для проведення досліджень за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки «Хвильові процеси в дисипативних структурах з різними граничними умовами» (термін виконання 2022-2023 рр., № держреєстрації 0122U002145). Робота також підтримувалася стипендією НАН України для молодих вчених (2019-2021 рр.).

В зазначених роботах дисертантка виступала в якості виконавця.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є встановлення фізичних закономірностей електронно-хвильової взаємодії в вакуумних резонаторах гіротронів на другій циклотронній гармоніці, що призводить до поліпшеної селекції мод.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати наступні **задачі**:

1. Розрахувати частоти і поля для власних мод вакуумних резонаторів з гофрованими поверхнями та провести аналіз точності розрахунків.
2. Визначити вплив глибини, ширини і кількості гофрів на власні частоти і власні поля гофрованого резонатора.
3. Обчислити омічну добротність резонатора гіротрона з поздовжніми гофрами та визначити її зміну в залежності від параметрів гофрів.
4. Розробити нелінійну самоузгоджену теорію для опису стаціонарної стадії взаємодії гвинтового пучка електронів з власними поперечно-електричними модами гофрованого резонатора гіротрона та встановити вплив гофрів на коефіцієнти зв'язку пучка електронів із власними модами резонатора гіротрона.
5. Розрахувати пороги генерації (стартові струми) робочої та конкуруючих мод у резонаторі з поздовжніми гофрами для гіротрона на другій циклотронній гармоніці.

Об'єктом дослідження є власні моди вакуумних резонаторів з гофрованими поверхнями для гіротронів.

Предметом дослідження є вплив гофрів у резонаторі гіротрона на частоти, поля, омичні втрати і стартові струми власних мод резонатора.

Методи дослідження. Для розв'язку задач, визначених темою дисертаційної роботи, використовувалися стандартні, добре апробовані аналітичні та чисельні методи, а також методи фізики пучків заряджених частинок. В якості основного аналітичного метода обрано метод просторових гармонік, який використовувався для визначення власних частот та полів резонатора гіротрона з поздовжніми гофрами. Використана вдосконалена модифікація даного метода, заснована на перерозкладанні полів на апертурі гофра в ряд по ортогональним поліномам Гегенбауера, для розрахунку власних значень і власних полів поперечно-магнітних (ТМ – **transverse magnetic**) мод. В основі цих аналітичних методів лежить метод часткових областей, в якому поперечний переріз гофрованого резонатора розділяється на області всередині і зовні гофрів. У кожній з цих областей поле представляється у вигляді розкладання в ряд по відомим базисним модам (гармонікам) та задовольняє умові неперервності полів на границі поділу областей і граничним умовам на ідеально-провідній поверхні резонатора. Для врахування омичних втрат у гофрованому резонаторі гіротрона зі скінченною провідністю стінок використовувався метод теорії збурень, який можна застосовувати при малому імпедансі металевої поверхні резонатора. Розв'язки дисперсійних рівнянь для власних мод резонаторів з гофрованими поверхнями знаходилися за допомогою ітераційного чисельного методу Мюллера. Для опису стаціонарної стадії генерації випромінювання у гофрованому резонаторі гіротрона використовувалася стандартна процедура зведення хвильового рівняння і рівнянь руху електронів пучка до системи звичайних диференціальних рівнянь. Дана процедура передбачає, що електрони пучка мають нульовий розкид за початковими швидкостями і ведучими центрами, малі ларморовські радіуси і об'ємний заряд, та взаємодіють з єдиною поперечно-електричною (ТЕ – **transverse electric**) модою резонатора на одній з гармонік циклотронної частоти. Отримана система диференціальних рівнянь розв'язувалася за допомогою чисельного методу Рунге-Кутти 4-го порядку з постійним кроком.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Вперше отримано дисперсійне рівняння та аналітичний вираз омичної добротності для ТЕ мод у металевому циліндричному резонаторі з поздовжніми гофрами, в яких враховується вплив вищих просторових гармонік на власні частоти і власні поля резонатора.

2. Вперше запропоновано вдосконалений метод розрахунку власних значень і власних полів для ТМ мод в коаксіальному резонаторі гіротрона з гофрованим внутрішнім провідником, що дозволяє врахувати умову Мейкснера на ребрах гофрів.

3. Вперше встановлено, що конверсія мод, викликана азимутальною періодичністю резонатора гіротрона з поздовжніми гофрами, залежить не тільки від кількості гофрів, але і від їх розміру.

4. Вперше виявлено, що гофри мають слабкий вплив на ТЕ моди циліндричного резонатора із довжиною хвилі, що дорівнює подвоєній глибині гофрів. Показано, що гофри із глибиною, близькою до чверті довжини хвилі, викликають значну конверсію ТЕ мод циліндричного резонатора в вищі просторові

гармоніки, яка супроводжується зміною їх частот, омичних добротностей та коефіцієнтів зв'язку з електронним пучком.

5. Вперше розроблено нелінійну самоузгоджену теорію для опису стаціонарної стадії взаємодії гвинтового пучка електронів з власними ТЕ модами гофрованого резонатора гіротрона. Для електронно-хвильової взаємодії у резонаторі отримано умову балансу потужностей.

6. Вперше продемонстровано поліпшення селективних властивостей резонаторів для гіротронів на другій циклотронній гармоніці при використанні поздовжніх гофрів з глибиною, близькою до половини довжини хвилі робочої моди.

Практичне значення одержаних результатів. Індукція магнітного поля 10 Тл є поточною межею для порівняно недорогих надпровідних магнітів, що використовуються у неперервних гіротронах. При оснащенні таким магнітом частота гіротрона на першій циклотронній гармоніці не може перевищувати 280 ГГц. Сучасні терагерцові технології потребують гіротронів у діапазоні частот від 0.3 до 1 ТГц. Це пояснює зростаючий інтерес до субтерагерцових гіротронів, які працюють на вищих гармоніках циклотронної частоти. Однак зі зростанням номера циклотронної гармоніки ККД гіротрона падає, що викликано зниженням інтенсивності взаємодії гвинтового пучка електронів з робочою модою у резонаторі гіротрона. З цієї ж причини робоча мода в такому гіротроні зазвичай має більш високий поріг генерації (стартовий струм) у порівнянні з конкуруючими модами на нижчих циклотронних гармоніках. У такій ситуації конкуруючі моди можуть служити істотною перешкодою для роботи гіротрона. Цим пояснюється практичне значення вдосконалених методів селекції мод у резонаторах гіротронів на вищих циклотронних гармоніках. У даній роботі теоретично показано, що поліпшені селективні властивості можуть мати резонатори гіротронів з поздовжніми гофрами. Такі резонатори можуть бути використані для придушення фундаментальних конкуруючих мод в субтерагерцових гіротронах на другій гармоніці циклотронної частоти.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертації, відображені в роботах [1-15], отримані автором особисто. Дисертантка приймала безпосередню участь у постановці мети і завдань досліджень, аналізі отриманих результатів, обговоренні проблемних моментів та висновків. Самостійно отримала всі аналітичні та чисельні результати, що представлені в опублікованих роботах.

Особистий внесок здобувача в роботах [1-14], опублікованих за темою дисертації у співавторстві, полягає в наступному.

В роботах [1, 7, 9] здобувачем досліджені власні ТМ моди в коаксіальному резонаторі гіротрона з гофрованим внутрішнім провідником. Розв'язана задача на власні значення методом перерозкладання власних полів на апертурі гофрів по поліномам Гегенбауера, що враховує особливості електромагнітного поля поблизу ребер гофрів. Знайдено вид дисперсійного рівняння для власних мод резонатора та розроблено чисельний код для його розв'язку. Досліджена точність методу, що використовується в роботі, для розрахунку власних значень і полів резонатора гіротрона в залежності від числа поліномів Гегенбауера.

В роботах [2, 10, 11] здобувач розв'язала задачу на власні значення для циліндричного резонатора гіротрона з поздовжніми гофрами методом просторових

гармонік. Отримала дисперсійне рівняння для знаходження власних значень ТЕ мод резонатора. Дослідила збіжність власних полів і похибки обчислення власних значень в залежності від числа врахованих просторових гармонік. Провела порівняння результатів точного методу просторових гармонік зі спрощеним методом поверхневого імпедансу, а також проаналізувала умови застосовності останнього.

В роботах [3, 4, 12] дисертантка отримала вираз для омічної добротності ТЕ мод в циліндричному резонаторі з поздовжніми гофрами, визначила вклад азимутальних гармонік Блоха в потік енергії через поперечний переріз хвилевідного каналу резонатора. В роботі [3] визначила параметри гофрів, при яких відношення омічних добротностей робочої та фундаментальної конкуруючої мод гіротрона на другій циклотронній гармоніці є максимальним, а конкуруюча мода схильна до найбільш ефективного придушення омічними втратами. Знайшла необхідне число гофрів, при якому конверсія робочої моди у вищі Блохівські гармоніки є малою. В роботі [4] дослідила власні частоти, омічні добротності, зв'язок азимутальних гармонік Блоха і розподіл поля у гофрованому резонаторі для робочої моди і найближчої фундаментальної моди гіротрона на другій циклотронній гармоніці в залежності від числа та глибини гофрів. Визначила параметри гофрів, що забезпечують селективне зростання омічних втрат фундаментальної конкуруючої моди та її конверсію в вищі гармоніки Блоха.

В роботах [5, 13] здобувач отримала нелінійну самоузгоджену систему рівнянь, що описують стаціонарну стадію електронно-хвильової взаємодії в циліндричному резонаторі гіротрона з поздовжніми гофрами. Отримала коефіцієнти зв'язку ТЕ мод резонатора з електронним пучком. Дослідила залежність коефіцієнтів зв'язку від числа та розмірів гофрів. Розрахувала стартовий струм ТЕ моди резонатора гіротрона з поздовжніми гофрами. Показала, що гофри мають слабкий та сильний вплив на стартовий струм ТЕ мод, коли глибина гофрів близька до половини та чверті довжини хвилі, відповідно. Визначила, що при сильному впливі гофрів стартовий струм ТЕ моди істотно збільшується через великі омічні втрати та значну конверсію мод у гофрованому резонаторі гіротрона.

В роботах [6, 14] дисертантка отримала аналітичний вид закону балансу потужностей для взаємодіючих пучка електронів і ТЕ моди резонатора гіротрона з поздовжніми гофрами. Дослідила вплив числа та розмірів гофрів на селективні властивості резонатора для гіротрона на другій циклотронній гармоніці. Для 0.3-ТГц гіротрона на другій циклотронній гармоніці знайшла параметри гофрів, що дозволяють розширити область одномодової генерації робочої моди гіротрона. Показала, що для цих параметрів вихідна потужність 0.3-ТГц гіротрона може бути збільшена. Встановила, що конверсія робочої моди гіротрона у вищі гармоніки Блоха призводить до погіршення модової чистоти у вихідному поперечному перерізі резонатора з поздовжніми гофрами.

В роботі [8] дисертанткою, в рамках наближення фіксованої структури поля, досліджено вплив амплітуди ТЕ моди у резонаторі з поздовжніми гофрами на динаміку гвинтового пучка електронів.

Роботу [15] виконано без співавторів. Здобувачем самостійно досліджено вплив просторових гармонік Фур'є на власні значення і власні поля резонаторів

гіротронів з поздовжніми гофрами. Здобувач розрахувала власні значення ТЕ моди в залежності від глибини гофрів для нижчих та більш високих радіальних мод, визначила розузгодження власних полів на апертурі гофрів та провела порівняння методу Блохівських гармонік з методом просторових гармонік. Проаналізувала вплив просторових гармонік Фур'є на власні значення в залежності від ширини гофрів.

Здобувач брала участь в отриманні та аналізі результатів досліджень, а також їх оформленні у вигляді наукових публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися, обговорювалися і отримали позитивну оцінку на наступних наукових конференціях і семінарах: XV Конференція з фізики високих енергій, ядерної фізики і прискорювачів (Харків, Україна, 21-24 березня 2017 р.); XIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та фахівців «Проблеми сучасної ядерної енергетики» (Харків, Україна, 18-20 жовтня 2017 р.); 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017) (Lviv, Ukraine, October 17-20, 2017); 2018 IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-2018) (Kyiv, Ukraine, July 2-5, 2018); International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion (ICPPCF-2018) (Kharkiv, Ukraine, September 10-13, 2018); XVII Конференція з фізики високих енергій і ядерної фізики (Харків, Україна, 26-29 березня 2019 р.); XVIII Конференція з фізики високих енергій і ядерної фізики (Харків, Україна, 24-27 березня 2020 р.); The 8th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2021) (Fukui, Japan, March 8-9, 2021); 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW-2022) (Kharkiv, Ukraine, November 14-18, 2022).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 15 наукових робіт: 6 статей [1-6] і 9 робіт у збірниках наукових праць, в матеріалах та тезах доповідей на наукових конференціях [7-15]. Статті [1-6] опубліковані у спеціалізованих фахових наукових виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз Scopus і Web of Science, серед них 3 статті [1-3] опубліковані в журналах, що входять до Q3, 2 статті [4, 5] – в журналах, що входять до Q2, 1 стаття [6] – в журналі, що входить до Q4 за Scimago Journal & Country Rank.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел та одного додатку. Обсяг дисертації складає 162 сторінки. Дисертація містить 58 рисунків і 1 таблицю. Список використаних джерел, викладений на 15 сторінках, становить 138 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами, визначені мета і завдання дослідження, наведені методи, що використовувалися для розв'язку задач дисертаційної роботи, сформульовані наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. Вказано особистий внесок здобувача в роботах у співавторстві. Висвітлені апробація роботи, публікації, її зміст і структура.

Перший розділ «Огляд літератури» присвячений огляду літератури з теми дослідження, де представлені основні проблеми, які існують у гіротронах на другій гармоніці циклотронної частоти. Наведені конструкції резонаторів таких гіротронів із поліпшеними селективними властивостями. Представлені методи аналізу власних мод резонаторів гіротронів, що найчастіше застосовуються для визначення електромагнітних характеристик хвильовідних структур з гофрованими поверхнями. До таких методів відносяться спрощений метод поверхневого імпедансу, метод Блохівських гармонік, метод просторових гармонік, метод перерозкладання власних полів та метод сингулярних інтегральних рівнянь.

У другому розділі **«Метод просторових гармонік для знаходження власних мод хвильоводів з металевими гофрованими поверхнями»** детально розглянуто метод просторових гармонік (МПП) для аналізу ТЕ і ТМ мод в високочастотних структурах з гофрованими поверхнями. Метод дозволяє з високим ступенем точності розрахувати власні значення і власні поля мод незалежно від параметрів гофрування. Для ТЕ мод в циліндричному хвильоводі з гофрованою металевою стінкою (рис. 1а) отримано систему рівнянь відносно амплітуд A_n та X_l гармонік Блоха і Фур'є, відповідно:

$$\begin{cases} \varphi_s \sum_{n=-N_B}^{N_B} A_n \delta_{nq} = \sum_{l=0}^{N_F} X_l R_l(k_q) \\ \sum_{n=-N_B}^{N_B} A_n f_n R_j(-k_n) = \frac{\varphi_L}{2} \sum_{l=0}^{N_F} X_l g_l \delta_{jl} (1 + \delta_{l0}) \end{cases} \quad (1)$$

де A_n та X_l – амплітуди n -ої гармоніки Блоха та l -ої гармоніки Фур'є, відповідно;

$f_n = \frac{J_{k_n}(k_{\perp} R_0)}{J'_{k_n}(k_{\perp} R_0)}$, $k_n = m + nN$, m – азимутальний індекс ТЕ моди, N – кількість

поздовжніх гофрів; $g_l = \frac{J_{\xi_l}(k_{\perp} R_0) N'_{\xi_l}(k_{\perp} R_d) - J'_{\xi_l}(k_{\perp} R_d) N_{\xi_l}(k_{\perp} R_0)}{J'_{\xi_l}(k_{\perp} R_0) N'_{\xi_l}(k_{\perp} R_d) - J'_{\xi_l}(k_{\perp} R_d) N_{\xi_l}(k_{\perp} R_0)}$, $\xi_l = \frac{\pi l}{\varphi_L}$,

$R_d = R_0 + d$, d – глибина гофра; $J_m(\cdot)$ та $N_m(\cdot)$ – функції Бесселя та Неймана m -го

порядку, відповідно; $R_l(k_q) = \int_{-\varphi_L/2}^{\varphi_L/2} \cos\left(\xi_l\left(\varphi + \frac{\varphi_L}{2}\right)\right) \cdot e^{-ik_q \varphi} d\varphi$, δ_{ij} – символ Кронекера.

Кількість гармонік Блоха та Фур'є становить $(2N_B + 1)$ та $(N_F + 1)$, відповідно.

Наведена система рівнянь (1) має нетривіальний розв'язок, якщо детермінант її матриці дорівнює нулю. Ця умова являє собою дисперсійне рівняння для знаходження власних значень $\chi = k_{\perp} R_0$ ТЕ-мод гофрованого хвильоводу.

Продемонстрована збіжність розрахунків методом просторових гармонік в залежності від кількості просторових гармонік Фур'є (N_F) і Блоха (N_B), що враховуються всередині гофрів і в каналі хвильоводу, відповідно (рис. 1б та рис. 1в).

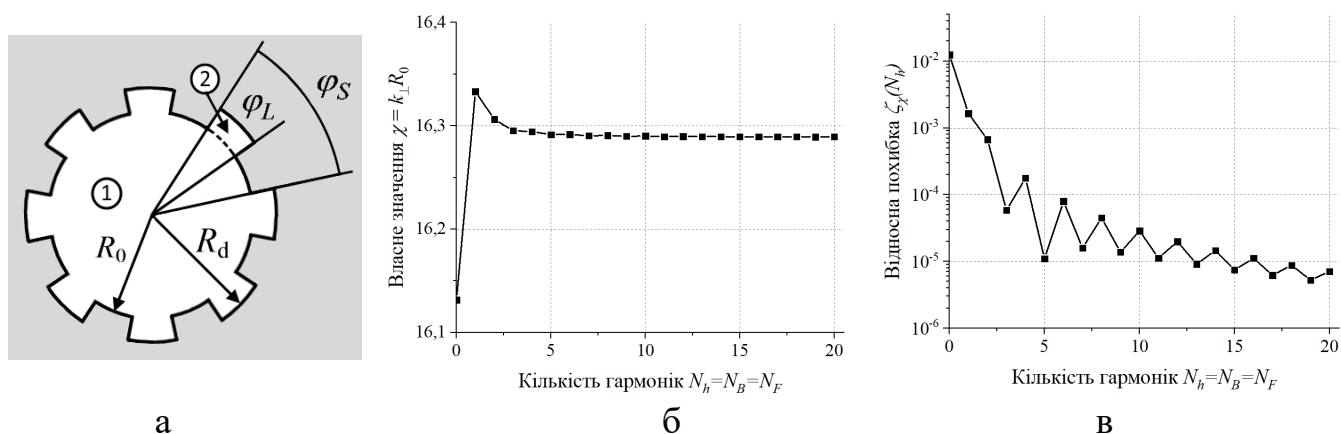


Рис. 1. (а) Поперечний переріз циліндричного хвелеводу з поздовжніми гофрами на стінках; (б) власне значення χ та (в) відносна похибка його обчислення ζ_{χ} в залежності від кількості врахованих просторових гармонік $N_h = N_B = N_F$.

Досліджена можливість застосування спрощених методів аналізу гофрованих структур: методу поверхневого імпедансу (або імпедансна модель – ІМ), в якому не враховується взаємодія між просторовими гармоніками, і методу Блохівських гармонік (МБГ), в якому нехтується внеском вищих Фур'є гармонік всередині гофрів. Було показано, що ІМ може призводити до некоректних результатів для циліндричних хвелеводів з гофрованими стінками, навіть якщо кількість гофрів є досить великою і задовольняє відомому емпіричному критерію застосовності ІМ моделі. Для невеликого числа гофрів більш висока точність може бути характерна для методу МБГ. Показано, однак, що даний метод придатний лише для нижчих радіальних мод і вузьких гофрів, ширина яких мала в порівнянні з половиною довжини хвилі для власних мод хвелеводу (рис. 2).

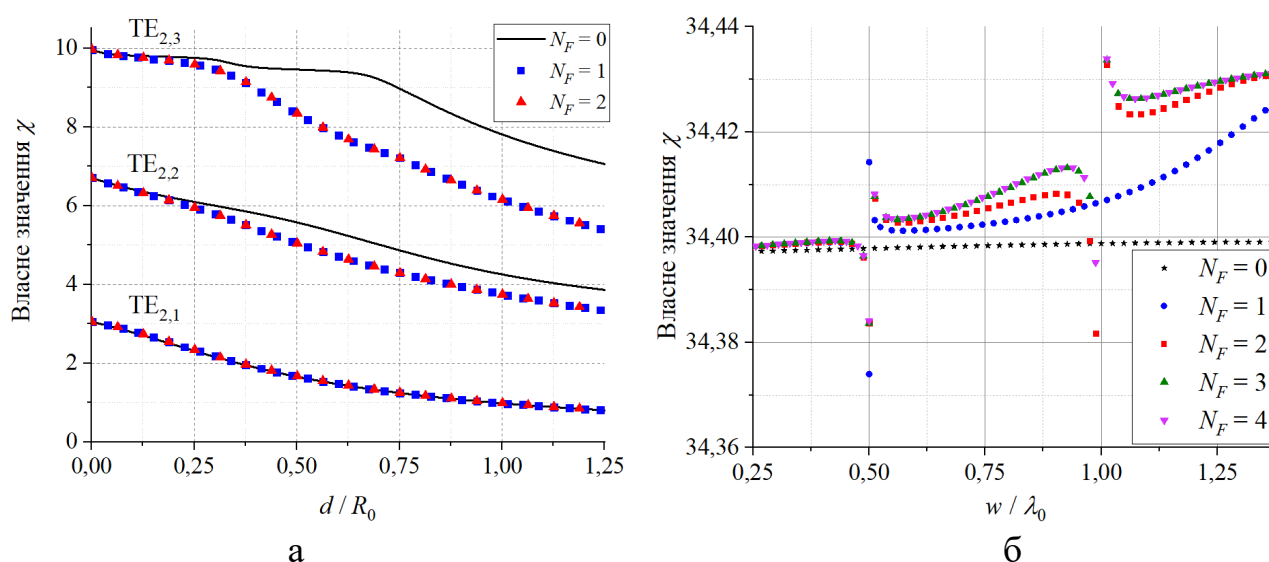


Рис. 2. Залежність власних значень χ від (а) відношення d/R_0 для мод з азимутальним індексом $m=2$ та (б) відношення w/λ_0 для моди $TE_{8,8}$.

Таким чином, при довільних розмірах і кількості гофрів необхідно використовувати строгий метод МПГ для розрахунку власних значень TE мод в

циліндричному хвилеводі з гофрованою металевою стінкою. Показано, що цей метод забезпечує достатньо високу точність розрахунку розподілу полів за поперечним перерізом гофрованого хвилеводу. Винятки можуть становити околиці поблизу ребер гофрів.

Вирішити проблему низької точності розрахунку власних полів гофрованої структури поблизу ребер гофрів можна за допомогою вдосконаленого метода просторових гармонік – метода перерозкладання власних полів (МПП). Розраховані власні значення і власні поля методом МПП на прикладі ТМ мод в коаксіальному хвилеводі з гофрованим внутрішнім провідником. Даний метод полягає в перерозкладанні полів на границі поділу хвилевідного каналу і гофрів в ряд по поліномам Гегенбауера, які, на відміну від гармонік Блоха і Фур'є, задовольняють умові Мейкснера на ребрах гофрів. Отримано дисперсійне рівняння для розрахунку власних значень ТМ мод в коаксіальному хвилеводі з гофрованою вставкою:

$$\det \|d_{jk}\| = 0, \quad d_{jk} = \frac{\varphi_L}{2\varphi_S} \sum_{n=-N_B}^{N_B} h_n t_{nk} t_{nj}^* - \sum_{l=1}^{N_F} q_l s_{lk} s_{lj}, \quad (2)$$

$$\text{де } h_n = \frac{Z_{k_n}^{1'}(k_{\perp} R_i)}{Z_{k_n}^1(k_{\perp} R_i)}, \quad q_l = \frac{Z_{\xi_l}^{2'}(k_{\perp} R_i)}{Z_{\xi_l}^2(k_{\perp} R_i)} \quad Z_{\nu}^{1(2)}(x) = J_{\nu}(x) + \alpha_{\nu}^{1(2)} N_{\nu}(x), \quad \alpha_{\nu}^1 = -\frac{J_{\nu}(k_{\perp} R_0)}{N_{\nu}(k_{\perp} R_0)},$$

$$\alpha_{\nu}^2 = -\frac{J_{\nu}(k_{\perp}(R_i - d))}{N_{\nu}(k_{\perp}(R_i - d))}, \quad t_{nk} = \int_{-1}^1 (1-t^2)^{2/3} \exp(-il_n t) P_k^{7/6}(t) dt, \quad l_n = \frac{k_n \varphi_L}{2},$$

$$s_{lk} = \int_{-1}^1 (1-t^2)^{2/3} \sin(v_l(t+1)) P_k^{7/6}(t) dt, \quad v_l = \frac{\pi l}{2}. \text{ Кількість врахованих гармонік Блоха і}$$

Фур'є складає $(2N_B + 1)$ і N_F , відповідно. Кількість поліномів Гегенбауера $(N_G + 1)$ визначає розмірність результуючої матриці відносно невідомих коефіцієнтів a_k :

$$\sum_{k=0}^{N_G} \sum_{j=0}^{N_G} a_k d_{jk} = 0.$$

Метод МПП демонструє дуже швидко збіжність власних значень для ТМ мод резонатора. Відносна похибка не перевищує $7 \cdot 10^{-6}$, навіть у випадку, коли дисперсійне рівняння містить одноелементну матрицю (число поліномів Гегенбауера $(N_G + 1)$ дорівнює одиниці). Метод МПП (N_G, N_B, N_F) також дозволяє помітно знизити розбіжність між мембранними функціями уздовж апертури гофра (рис. 3).

Завдяки цьому, в порівнянні з числом гармонік Блоха і Фур'є в початковому методі МПГ, кількість поліномів Гегенбауера в удосконаленому методі МПП може бути обрана набагато меншою, щоб гарантувати таку ж точність розрахунку власних значень і полів хвилеводу. Як наслідок, розмір матриці, що входить в дисперсійне рівняння, може бути помітно знижений. Це, в свою чергу, дозволяє уникнути труднощів при обчисленні детермінантів матриць великого розміру і значно скорочує час комп'ютерних обчислень, необхідний для чисельного розв'язку задачі на власні значення.

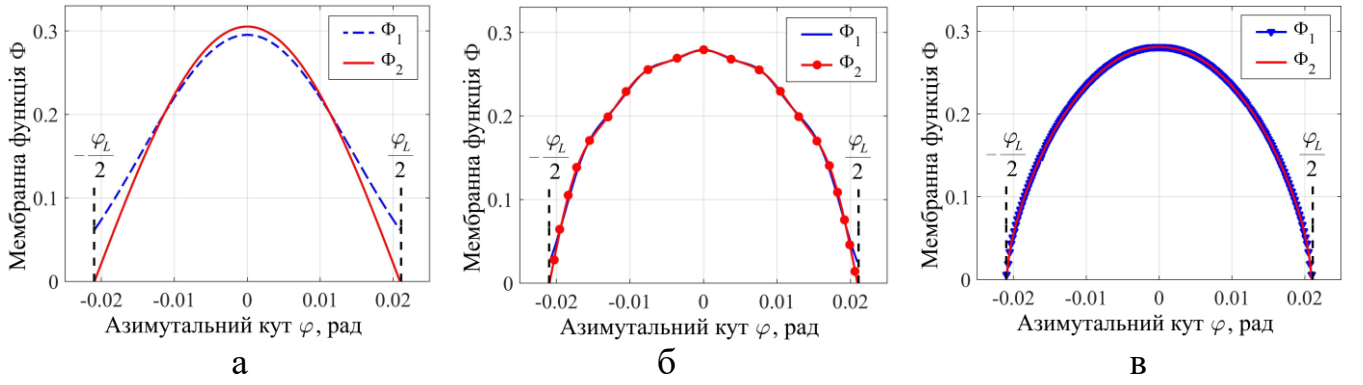


Рис. 3. Залежність мембранної функції від азимутального кута на апертурі гофра: а – метод МПП (0,2,2); б – метод МПП (3,10,10); в – метод МПП (10,100,100).

Матеріали даного розділу опубліковані в роботах [1, 2] та доповідалися на конференціях [7-11, 15].

Третій розділ «Селекція мод у резонаторах з поздовжніми гофрами для гіротронів на другій циклотронній гармоніці» присвячений дослідженню селективних властивостей гофрованих резонаторів для гіротронів на другій циклотронній гармоніці з метою знаходження оптимальних параметрів резонатора для найбільш ефективного придушення фундаментальних конкуруючих мод. Вказано на можливість використання омичних втрат для селективного придушення цих мод у гофрованих резонаторах для гіротронів на другій циклотронній гармоніці. Для розрахунку омичних втрат, викликаних гофруванням стінки резонатора, отримано вираз для поперечного хвильового числа у гофрованому хвилеводі зі скінченною провідністю стінки:

$$k_{\perp a}^2 \approx k_{\perp}^2 \left[1 - (1+j) \frac{\delta_s}{R_0} \frac{p_c \sum_{n=-N_B}^{N_B} |A_n|^2 C_1 - 0.5w \sum_{l=0}^{N_F} (1+\delta_{l0}) |X_l|^2 C_2 + 2 \sum_{l=0}^{N_F} |X_l|^2 C_3}{p_c \sum_{n=-N_B}^{N_B} |A_n|^2 Z_1 + 0.5w \sum_{l=0}^{N_F} (1+\delta_{l0}) |X_l|^2 Z_2} \right], \quad (3)$$

де $p_c = \varphi_s R_0$ – період гофрів, $\delta_s = \sqrt{2/\omega \mu_0 \sigma}$ – глибина скін-шара, σ – питома електропровідність матеріалу хвилеводу,

$$C_1 = f_n^2, \quad C_2 = g_l^2 - R_d/R_0 g_l^2(R_d), \quad C_3 = \int_{R_0}^{R_d} g_l^2(r) dr,$$

$$Z_1 = 1 + (1 - k_n^2/\chi^2) f_n^2, \quad Z_2 = (R_d^2/R_0^2 - \xi_l^2/\chi^2) g_l^2(R_d) - (1 - \xi_l^2/\chi^2) g_l^2 - 1.$$

Загасання моди у металевому вакуумному хвилеводі можна характеризувати за допомогою омичної добротності $Q_{ohm} = \frac{\text{Re}(k_{\perp a})}{|2 \text{Im}(k_{\perp a})|}$, обернено пропорційної до

величини омичних втрат. Показано, що омичні втрати у гофрованих резонаторах можуть призводити до збільшення відношення омичних добротностей робочої і конкуруючих мод $f_Q = Q_{ohm}(\text{oper.mode})/Q_{ohm}(\text{compet.mode})$. Однак для найбільшої ефективності даного методу потрібна велика кількість гофрів у резонаторі

гіротрона, що може ускладнити процес їх виготовлення. Інакше, робоча мода гіротрона, яка є фундаментальною гармонікою Блоха у гофрованому резонаторі, зазнає небажаного ефекту конверсії мод.

Цей ефект пояснюється зв'язком гармонік Блоха внаслідок азимутальної періодичності резонатора гіротрона і впливає на власні частоти резонатора. Зі збільшенням глибини гофрів такий зв'язок стає сильнішим і викликає конверсію фундаментальної гармоніки Блоха в вищі гармоніки. Щоб продемонструвати явище конверсії мод у гофрованому хвилеводі, введено параметр α_n , який показує внесок азимутальної базисної моди з індексом k_n в повний потік енергії зв'язаних гармонік Блоха в хвилевідному каналі:

$$\alpha_n = \frac{P_n}{P}, P = \sum_{n=-N_B}^{N_B} P_n, P_n = \int_0^{R_0} \left(\left| \frac{\partial \Psi_{1n}}{\partial r} \right|^2 + \frac{k_n^2}{r^2} |\Psi_{1n}|^2 \right) r dr, \quad (4)$$

де $\Psi_{1n} = \sum_{n=-N_B}^{N_B} A_n f_n(r)$, $\sum_{n=-N_B}^{N_B} \alpha_n = 1$. Очевидно, що конверсія робочої моди в вищі гармоніки Блоха відсутня при $\alpha_0 = 1$ ($n = 0$).

Показано, що конверсія мод у гофрованому резонаторі залежить не тільки від кількості гофрів, але і від їхньої глибини (рис. 4).

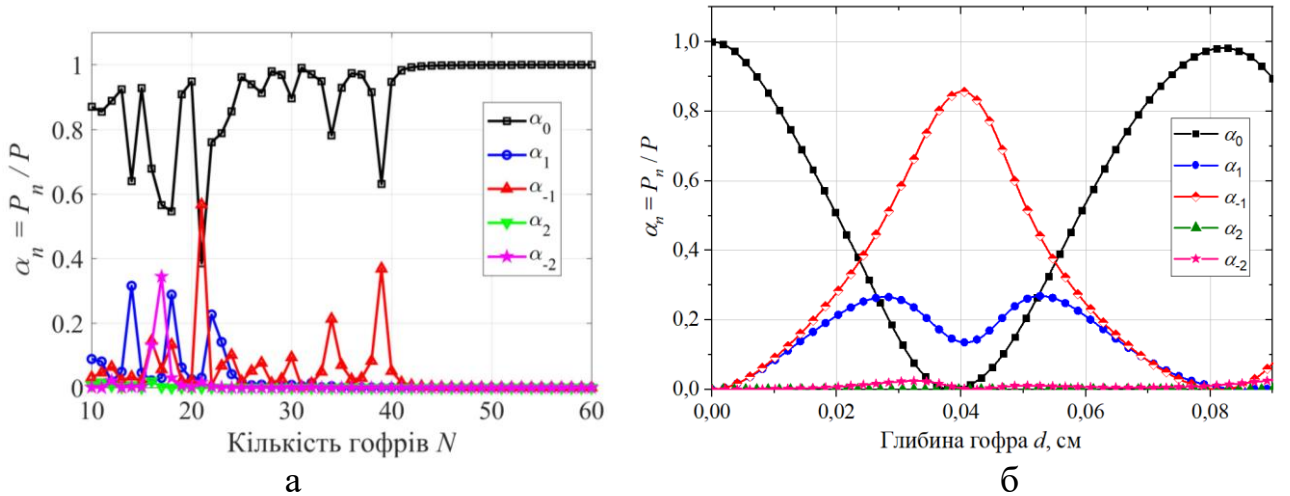


Рис. 4. Параметр α_n в залежності від (а) кількості гофрів N і (б) їх глибини d .

Виявлено, що конверсія мод є зазвичай малою, якщо глибина гофрів є близькою до половини довжини хвилі (рис. 5а). Тому така глибина є доцільним вибором для робочої моди на другій гармоніці циклотронної частоти.

Разом з високою модовою чистотою вона також здатна забезпечити відносно низькі омічні втрати для робочої моди, які зменшуються зі зменшенням кількості гофрів. Ця глибина гофра відповідає приблизно чверті довжини хвилі конкуруючих мод на першій гармоніці (рис. 5б). Показано, що за такої умови конкуруючі моди схильні до конверсії в моди з більш високими азимутальними індексами і радіусами каустики, навіть якщо кількість гофрів є достатньо великою. Тому зв'язок пучка з

конкуруючими модами на першій циклотронній гармоніці слабшає через конверсію мод.

Додатковим чинником, що сприяє придушенню конкуруючої моди, є омичні втрати, які зазвичай високі для мод у випадку, коли глибина гофрів є близькою до чверті довжини хвилі (рис. 6а). Для селекції мод важливо також контролювати частотне розділення між робочою модою на другій гармоніці циклотронної частоти та конкуруючими модами на першій гармоніці. Було встановлено, що для обраної глибини гофра таке частотне розділення залежить від кількості гофрів (рис. 6б), а, отже, за необхідності, може бути оптимізовано.

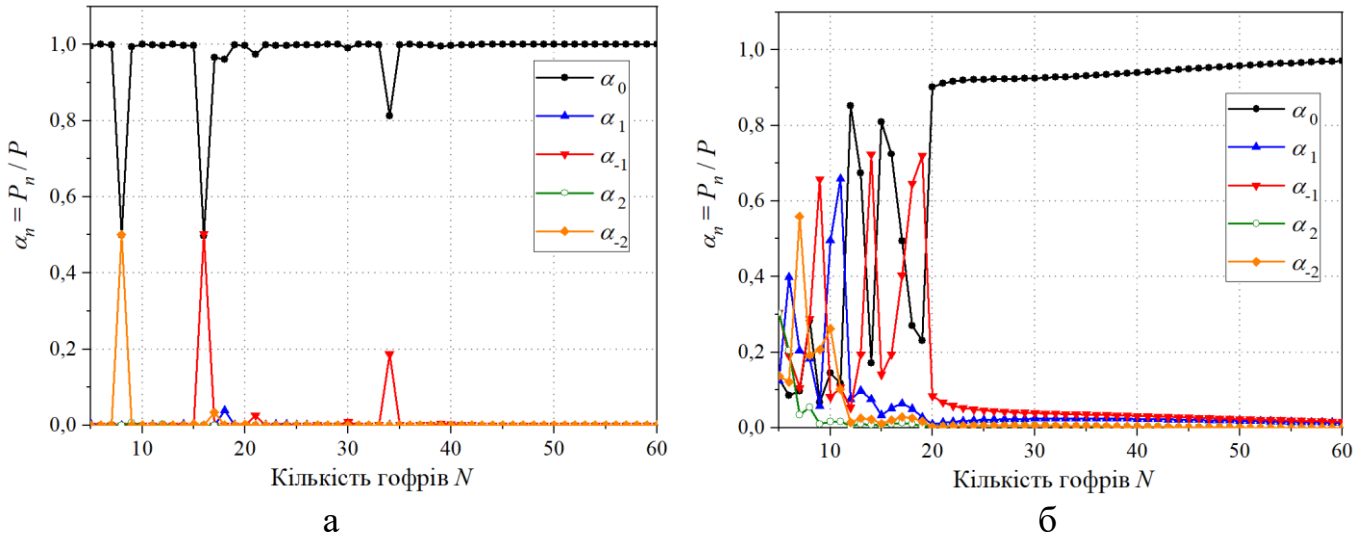


Рис. 5. Модовий склад α_n (а) робочої моди і (б) конкуруючої моди в залежності від числа гофрів для глибини d , що близька до половини довжини хвилі робочої моди.

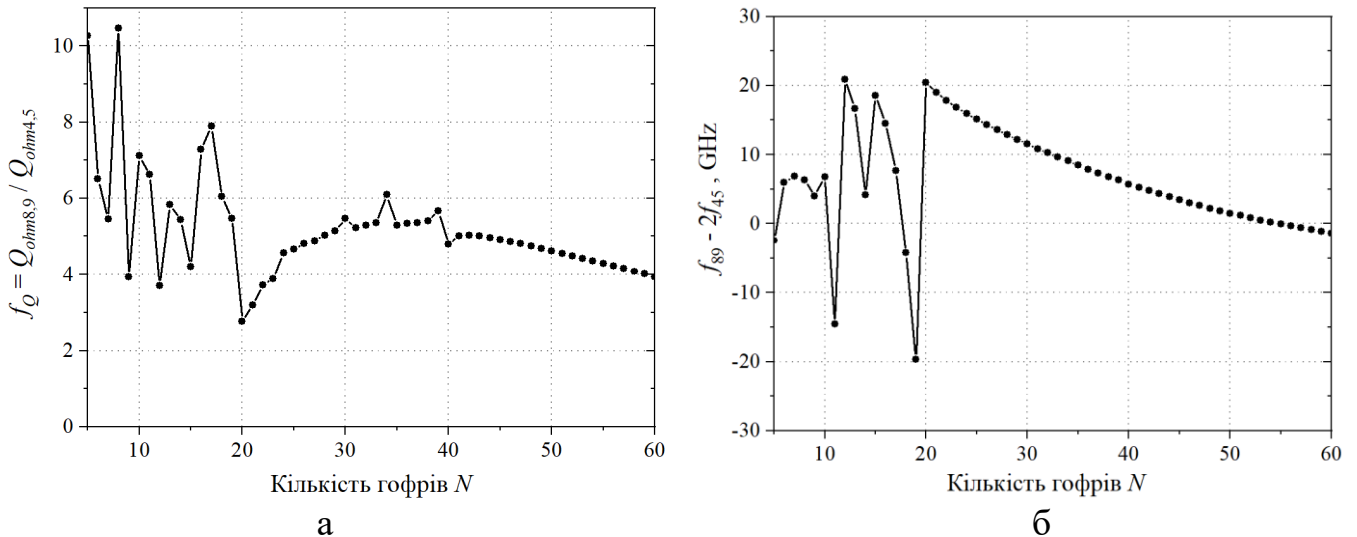


Рис. 6. (а) Відношення $f_Q = Q_{8,9} / Q_{4,5}$ і (б) частотне розділення Δf між робочою модою на другій циклотронній гармоніці і конкуруючою модою на першій гармоніці в залежності від числа гофрів N .

Матеріали даного розділу опубліковані в роботах [3, 4] та доповідалися на конференції [12].

У четвертому розділі «Самоузгоджена нелінійна теорія електронно-хвильової взаємодії у резонаторах з поздовжніми гофрами» отримані самоузгоджені рівняння в одномодовому наближенні (рівняння гіротрона), які описують стаціонарну стадію взаємодії між гвинтовим пучком електронів і ТЕ модою циліндричного резонатора з довільним числом поздовжніх гофрів:

$$\left\{ \begin{aligned} \left(\frac{\partial^2}{\partial \zeta^2} + \delta^2 \right) F(\zeta) &= I_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{n,s} (k_{\perp}/k)^s \langle p_e^s \exp(i(s-k_n)\Psi_0) \rangle, \\ \frac{dp_e}{d\zeta} &= ip_e \frac{\gamma}{\gamma_0} \frac{2}{\beta_{\perp 0}^2} \frac{\omega - s\omega_c}{s\omega} - i \frac{\gamma}{\gamma_0} F(\zeta) (p_e^*)^{s-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{n,s} (k_{\perp}/k)^s \exp(i(k_n - s)\Psi_0), \end{aligned} \right. \quad (5)$$

де $\zeta = \frac{k\beta_{\perp 0}^2}{2\beta_{z0}} z$, $k = \frac{\omega}{c}$, $\beta_{\perp 0} = V_{\perp 0}/c$, $\beta_{z0} = V_{z0}/c$, $V_{\perp 0}$ і V_{z0} – початкова поперечна і

поздовжня швидкості електронів, відповідно, $\delta^2 = (k^2 - k_{\perp}^2)4\beta_{z0}^2/(k^2\beta_{\perp 0}^4)$,

$$F(\zeta) = -\frac{f(z)}{B_0} \frac{k^2\beta_{\perp 0}^{s-4}}{(s-1)!2^{s-1}} \left(\frac{\omega}{\omega_{c0}} \right)^{s-2} \sqrt{N_{mn}} \exp\left(-i\frac{s}{2}\pi\right),$$

$f(z)$ – амплітуда поля ТЕ моди, B_0 – індукція зовнішнього магнітного поля, s – номер циклотронної гармоніки, $\omega_{c0} = \omega_H/\gamma_0$ – початкове значення циклотронної частоти обертання електронів, $\omega_H = eB_0/(m_e c)$, e і m_e – заряд і маса спокою електрона, відповідно, $\gamma = \gamma_0 \sqrt{1 + \beta_{\perp 0}^2(|p|^2 - 1)}$ і $\gamma_0 = 1 + eV_b/(m_e c^2)$ – релятивістський фактор і його початкове значення, відповідно, V_b – напруга пучка, $N_{mn} = P + P_c$,

$$P_c = \frac{\varphi_L}{\varphi_s} \frac{\chi^2}{2} \sum_{l=0}^{\infty} |X_l|^2 (1 + \delta_{l0}) \left[\left(\frac{R_d^2}{R_0^2} - \frac{\xi_l^2}{\chi^2} \right) g_l^2(R_d) - \frac{2}{\chi} g_l - \left(1 - \frac{\xi_l^2}{\chi^2} \right) g_l^2 - 1 \right],$$

$$I_0 = 64 \frac{I_b}{I_A} \frac{\beta_{z0} s^2 \beta_{\perp 0}^{2(s-4)} \omega_{c0}^{2(s-1)}}{\gamma_0 (s!)^2 2^{2s} \omega_{c0}^{2(s-1)}}, \quad I_b \text{ – струм електронного пучка, } I_A = m_e c^3/e \approx 17 \text{ кА,}$$

$$C_{n,s} = \frac{J_{k_n-s}(k_{\perp} r_c)}{J'_{k_n}(\chi)} \sqrt{\frac{\alpha_n}{N_{mn}} \frac{P}{P_n}} \text{ – коефіцієнт зв'язку пучка з } n\text{-ою гармонікою Блоха, } r_c \text{ –}$$

радіус пучка, $p_e = \left(\frac{p_{\perp}}{p_{\perp 0}} \right) \exp(i\Lambda_j)$, $p_{\perp} = m_e V_{\perp} \gamma$ і $p_{\perp 0} = m_e V_{\perp 0} \gamma_0$ – поперечний імпульс електронів пучка і його початкове значення, відповідно, Λ_j – фаза, що повільно змінюється, Ψ_0 – азимутальна координата ведучого центру пучка, $\omega_c = eB_0/(m_e c \gamma)$.

Дана система рівнянь враховує вплив поздовжніх гофрів у резонаторі гіротрона на взаємодію пучка з власною ТЕ модою резонатора. Для такої стадії взаємодії знайдено умову балансу потужностей в системі пучок-хвиля:

$$I_0 \eta_{\perp} = 2 \operatorname{Re} \delta(\xi_{out}) |F(\xi_{out})|^2 + \frac{16\beta_{z0}^2}{\beta_{\perp 0}^4} \operatorname{Re}(Z_s G_{mn}), \quad (6)$$

де $\eta_{\perp} = 1 - \langle |p(\zeta_{out})|^2 \rangle$ – поперечний електронний ККД гіротрона,
 $G_{mn} = \int_0^{\xi_{out}} \frac{k_{\perp}^3 \chi}{k^3 N_{mn}} |F(\xi)|^2 W_0 d\xi$, $Z_s = (1-i)k\delta_s$ – нормований імпеданс провідної поверхні.

Показано, що для мод резонатора наявність гофрів не тільки змінює власні значення і омічні втрати, але також впливає на зв'язок мод з електронним пучком (рис. 7). Використовуючи це, рівняння гіротрона були застосовані для дослідження впливу параметрів гофрування на стартовий струм ТЕ моди резонатора гіротрона.

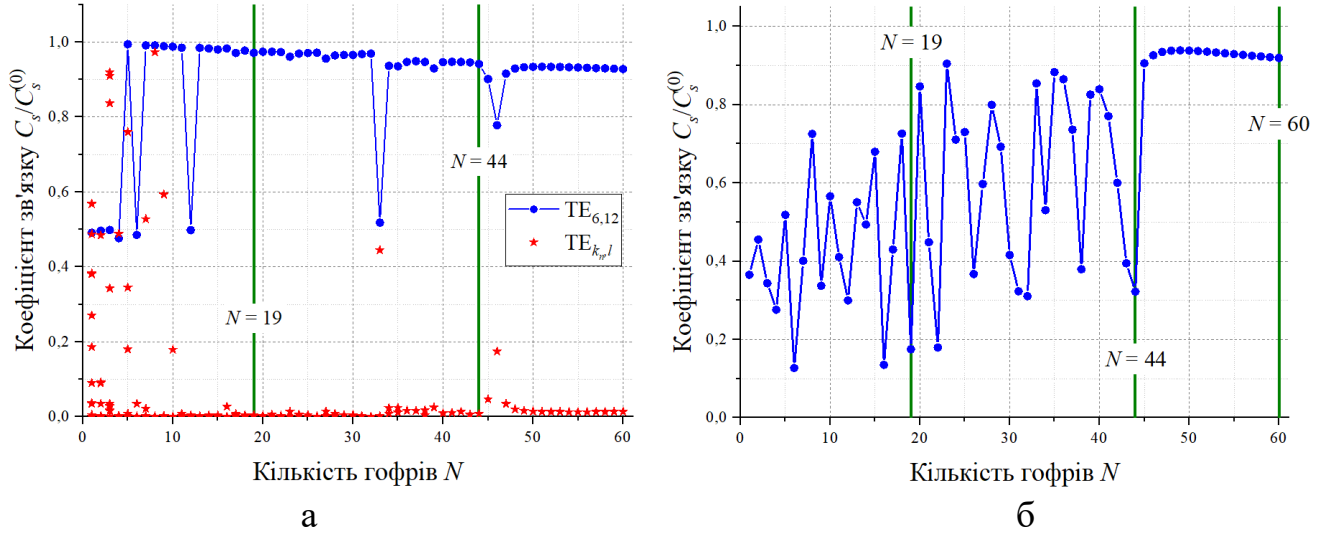


Рис. 7. Нормовані максимальні коефіцієнти зв'язку пучок-хвиля $C_s/C_s^{(0)}$
 $(C_s = \max\{C_{n,s}^2\}$ та C_s дорівнює $C_s^{(0)}$ при $d = 0$) при глибині (а) $d = \lambda_0/2$ і (б)
 $d = \lambda_0/4$.

У загальному випадку така мода має вигляд суперпозиції азимутальних гармонік Блоха, зв'язок між якими суттєво залежить від глибини гофрів. Для гофрів з глибиною, яка дорівнює половині довжини хвилі, цей зв'язок виявляється слабким, навіть незважаючи на те, що спектр гармонік Блоха стає щільнішим зі зменшенням числа гофрів (рис. 7а). В цьому випадку гармоніки Блоха поведуться так само, як ТЕ-моди гладкого циліндричного резонатора. Як наслідок, для ТЕ моди у резонаторі гіротрона комплексне поперечне хвильове число і коефіцієнт зв'язку з пучком схильні до слабого впливу гофрів з півхвильовою глибиною. Було показано, що при цьому спостерігається лише невелике зміщення стартового струму ТЕ моди, яке викликане переважно омічними втратами у гофрованій стінці резонатора. На відміну від цього, при чвертьхвильовій глибині гофрів зв'язок різних азимутальних гармонік Блоха у резонаторі гіротрона стає сильним і суттєво впливає на власне значення ТЕ моди. Крім того, було виявлено, що такий зв'язок гармонік призводить до ослаблення зв'язку ТЕ моди з електронним пучком (рис. 7б). Було показано, що завдяки цьому гофри у резонаторі гіротрона дозволяють в кілька разів збільшити стартовий струм для ТЕ моди резонатора з частотою, що відповідає чвертьхвильовій глибині гофрів (рис. 8).

Показано, що поздовжні гофри у резонаторі можуть бути використані для селективного придушення фундаментальних конкуруючих мод у гіротронах на другій циклотронній гармонії. Як приклад розглянуто 0.3-ТГц гіротрон на другій циклотронній гармонії. Для цього гіротрона знайдені оптимальні параметри гофрованого резонатора ($d = 0.05$ см, $w = 0.02$ см, $N = 15$) і проведено розрахунок стартових струмів для робочої і конкуруючих мод. Показано, що використання резонатора з такими параметрами дозволяє розширити діапазон одномодової генерації робочої моди і забезпечує можливість збільшення вихідної потужності для 0.3-ТГц гіротрона на другій циклотронній гармонії (рис. 9).

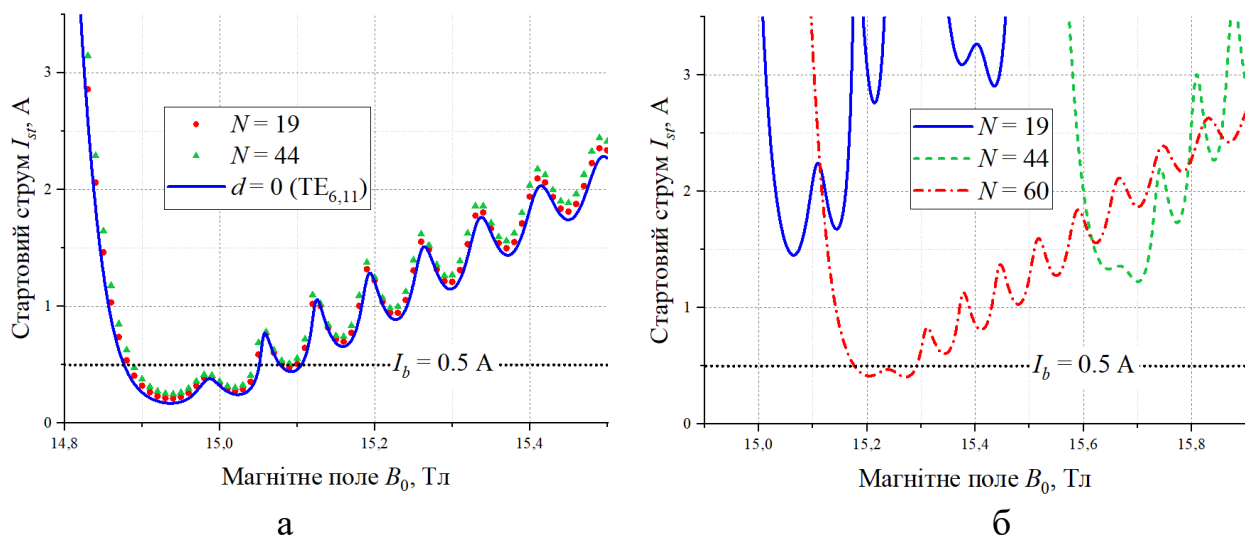


Рис. 8. Стартові струми I_{st} мод в циліндричному гофрованому резонаторі гіротрона з глибиною d , що дорівнює (а) половині і (б) чверті довжини хвилі.

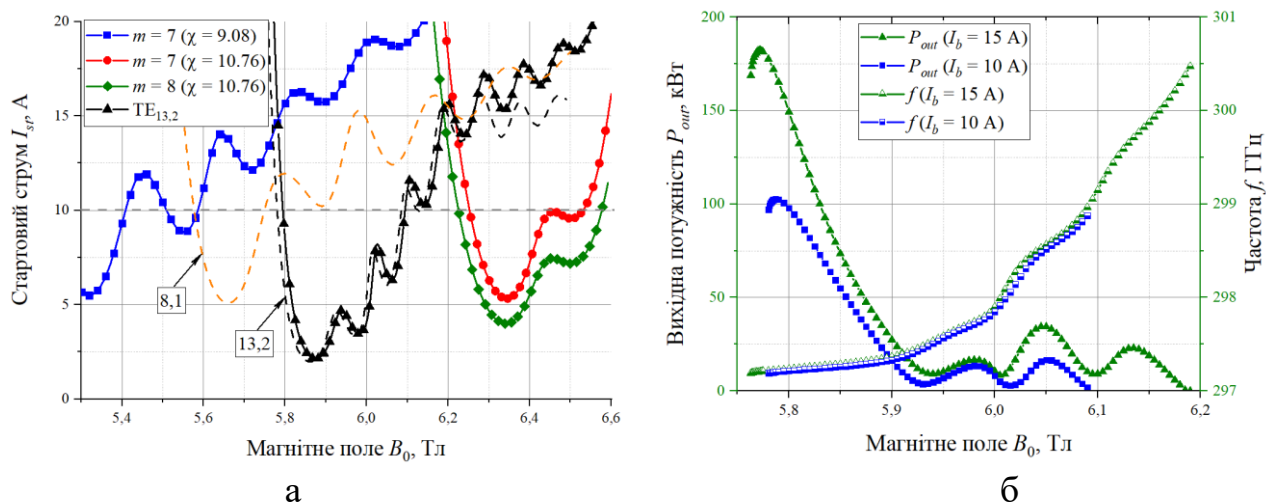


Рис. 9. Стартовий струм I_{st} в залежності від індукції магнітного поля B_0 для робочої моди $TE_{13,2}$ і фундаментальних конкуруючих мод в 0.3-ТГц гіротроні на другій циклотронній гармонії з оптимізованим гофрованим резонатором і (б) вихідна потужність P_{out} гіротрона в залежності від B_0 .

Матеріали даного розділу опубліковані в роботах [5, 6] та доповідалися на конференціях [13, 14].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язане важливе наукове завдання зі встановлення фізичних закономірностей електронно-хвильової взаємодії у вакуумних резонаторах гіротронів на другій циклотронній гармоніці. Встановлені умови поліпшення селективних властивостей таких резонаторів гіротронів для придушення фундаментальних конкуруючих мод.

Основні результати та висновки, що отримані в дисертаційній роботі, полягають в наступному:

1. Методом просторових гармонік вперше отримано дисперсійне рівняння для ТЕ мод у металевому циліндричному резонаторі з поздовжніми гофрами, а також аналітичний вираз омичної добротності. Це дозволяє врахувати вплив вищих просторових гармонік на власні частоти і власні поля резонатора, забезпечуючи високу точність розрахунків.

2. Вперше визначені власні значення і власні поля ТМ мод в коаксіальному резонаторі гіротрона з гофрованим внутрішнім провідником вдосконаленим методом на основі перерозкладання полів, що дозволяє врахувати умову Мейкснера на ребрах гофрів. Як наслідок, досягається висока точність виконання умови неперервності полів на границі поділу хвилевідного каналу і гофрів, а також скорочується час для чисельних розв'язків задачі на власні значення.

3. В ході детального дослідження конверсії мод, викликані азимутальною періодичністю резонатора гіротрона з поздовжніми гофрами, вперше виявлено, що на конверсію мод істотно впливає кількість гофрів та їхня глибина. Така особливість гофрованого резонатора може бути використана для селекції мод.

4. Вперше знайдені співвідношення між глибиною гофрів та довжиною хвилі, при яких спостерігається слабка та сильна конверсія мод в вищі просторові гармоніки. В останньому випадку конверсія супроводжується зміною частот, омичних добротностей та коефіцієнтів зв'язку з електронним пучком для ТЕ мод циліндричного резонатора. Завдяки цьому, можна забезпечити ефективне селективне придушення конкуруючих мод у резонаторах гіротронів на другій циклотронній гармоніці.

5. Вперше розроблено нелінійну самоузгоджену теорію для опису стаціонарної стадії взаємодії гвинтового пучка електронів з власними ТЕ модами гофрованого резонатора гіротрона. Отримано аналітичний вираз балансу потужностей для пучка і моди, які взаємодіють. Це дозволило детально проаналізувати електронно-хвильову взаємодію у резонаторі гіротрона на другій циклотронній гармоніці та показати вплив гофрів на стартові струми робочої на конкуруючих мод.

6. Вперше встановлено, що використання поздовжніх гофрів з глибиною, близькою до половини довжини хвилі робочої моди призводить до поліпшення селективних властивостей резонаторів для гіротронів на другій циклотронній гармоніці, а також дозволяє розширити діапазон одномодової генерації робочої моди і збільшити вихідну потужність гіротрона.

Таким чином, вдосконалений метод селекції мод, в основі якого лежить використання поздовжніх гофрів з визначеними параметрами, забезпечує ефективне

придушення фундаментальних конкуруючих мод у резонаторах гіротронів на другій гармоніці циклотронної частоти, що дозволяє побудувати резонатори гіротронів, які ефективно працюють у терагерцовому діапазоні частот.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Tkachova T. I., Shcherbinin V. I., Tkachenko V. I. Efficient approach to analysis of TM modes in coaxial gyrotron cavity with corrugated insert. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2018. No 4. P. 62-66. (Особистий внесок здобувача: у постановці мети і завдання дослідження, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, обговоренні та аналізі отриманих результатів) (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, квартиль Q3, та до списку фахових видань України категорії «А»)
2. Tkachova T. I., Shcherbinin V. I., Tkachenko V. I. Eigenvalues and eigenfields of a corrugated gyrotron cavity with conducting walls. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2018. No 6. P. 67-70. (Особистий внесок здобувача: у постановці мети і завдання дослідження, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, обговоренні та аналізі отриманих результатів) (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, квартиль Q3, та до списку фахових видань України категорії «А»)
3. Tkachova T. I., Shcherbinin V. I., Tkachenko V. I. Mode selection by ohmic losses in longitudinally corrugated cavities of sub-THz second-harmonic gyrotrons. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2019. No 4. P. 31-34. <https://doi.org/10.46813/2019-122-031> (Особистий внесок здобувача: у постановці мети і завдання дослідження, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, обговоренні та аналізі отриманих результатів) (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, квартиль Q3, та до списку фахових видань України категорії «А»)
4. Tkachova T. I., Shcherbinin V. I., Tkachenko V. I. Selectivity properties of cylindrical waveguides with longitudinal wall corrugations for second-harmonic gyrotrons. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2019. Vol. 40, No 10. P. 1021-1034. <https://doi.org/10.1007/s10762-019-00623-y> (Особистий внесок здобувача: у постановці мети і завдання дослідження, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, обговоренні та аналізі отриманих результатів) (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, квартиль Q2)
5. Tkachova T. I., Shcherbinin V. I., Tkachenko V. I., Ioannidis Z. C., Thumm M., Jelonnek J. Starting currents of modes in cylindrical cavities with mode-converting corrugations for second-harmonic gyrotrons. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2021. Vol. 42, No 3. P. 260-274. <https://doi.org/10.1007/s10762-021-00772-z> (Особистий внесок здобувача: у постановці мети і завдання дослідження, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, обговоренні та аналізі отриманих результатів) (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, квартиль Q2)
6. Tkachova T. I., Shcherbinin V. I., Tkachenko V. I. Mode-converting corrugations for cavities of second-harmonic gyrotrons with improved performance. *East*

European Journal of Physics. 2021. No 2. P. 89-97. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2021-2-05> (Особистий внесок здобувача: у постановці мети і завдання дослідження, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, обговоренні та аналізі отриманих результатів) (Видання входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, квартиль Q4, та до списку фахових видань України категорії «А»)

7. Ткачева Т. И., Ткаченко В. И., Щербинин В. И. Эффективный метод расчета собственных значений ТМ мод в резонаторе коаксиального гиротрона с гофрированной вставкой. *XV Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям* (Харьков, Украина, 21-24 марта 2017г.). Харьков, 2017. С. 114. (Особистий внесок здобувача: у постановці мети і завдання дослідження, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, обговоренні, аналізі та презентації результатів)

8. Ткачева Т. И., Щербинин В. И., Максименко А. В., Ткаченко В. И. Влияние конверсии мод в резонаторе с распределенными гофраами на КПД гиротрона для ЯМР-спектроскопии. *XIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та фахівців «Проблеми сучасної ядерної енергетики»* (Харків, Україна, 18-20 жовтня 2017р.). Харків, 2017. С. 41-42. (Особистий внесок здобувача: у постановці мети і завдання дослідження, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, обговоренні, аналізі та презентації результатів)

9. Tkachova T. I., Tkachenko V. I., Shcherbinin V. I. Electromagnetic field calculation for TM modes of coaxial gyrotron cavity. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)* (Lviv, Ukraine, October 17-20, 2017). Lviv, 2017. P. 126. (Особистий внесок здобувача: у постановці мети і завдання дослідження, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, обговоренні, аналізі та презентації результатів)

10. Tkachova T. I., Shcherbinin V. I., Tkachenko V. I. Validity of surface impedance model for electromagnetic analysis of a corrugated gyrotron cavity. *2018 IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)* (Kyiv, Ukraine, July 2-5, 2018). Kyiv, 2018. P. 238-241. <https://doi.org/10.1109/MMET.2018.8460433> (Особистий внесок здобувача: у постановці мети і завдання дослідження, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, обговоренні, аналізі та презентації результатів)

11. Tkachova T. I., Shcherbinin V. I., Tkachenko V. I. Eigenvalues and eigenfields of a corrugated gyrotron cavity with conducting walls. *International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion* (Kharkiv, Ukraine, September 10-13, 2018). Kharkiv, 2018. P. 56. (Особистий внесок здобувача: у постановці мети і завдання дослідження, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, обговоренні, аналізі та презентації результатів)

12. Ткачева Т. И., Щербинин В. И., Ткаченко В. И. Селекция мод омическими потерями в гофрированных резонаторах гиротрона на второй циклотронной гармонике. *XVII Конференция по физике высоких энергий и ядерной физике* (Харьков, Украина, 26-29 марта 2019г.). Харьков, 2019. С. 80-81. (Особистий внесок здобувача: у постановці мети і завдання дослідження, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, обговоренні, аналізі та презентації результатів)

13. Ткачева Т. И., Щербинин В. И., Ткаченко В. И. Влияние конверсии пространственных гармоник в гофрированном резонаторе на стартовый ток гиротрона. *XVIII Конференция по физике высоких энергий и ядерной физике* (Харьков, Украина, 24-27 марта 2020г.). Харьков, 2020. С. 76-77. *(Особистий внесок здобувача: у постановці мети і завдання дослідження, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, обговоренні, аналізі та презентації результатів)*

14. Tkachova T. I., Shcherbinin V. I., Tkachenko V. I. Mode-converting corrugations for mode selection in cavities of second-harmonic gyrotrons. *The 8th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT)* (Fukui, Japan, March 8-9, 2021). Fukui, 2021. P-23. *(Особистий внесок здобувача: у постановці мети і завдання дослідження, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, обговоренні, аналізі та презентації результатів)*

15. Tkachova T. Effect of high Fourier harmonics on characteristics of corrugated cylindrical waveguides. *2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW)* (Kharkiv, Ukraine, November 14-18, 2022). Kharkiv, 2022. P. 254-257. <https://doi.org/10.1109/UkrMW58013.2022.10037155> *(Особистий внесок здобувача: у постановці мети і завдання дослідження, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, аналізі та презентації результатів)*

АНОТАЦІЯ

Ткачова Т.І. Електронно-хвильова взаємодія в металевих резонаторах з поздовжніми гофрами для гіротронів на другій циклотронній гармоніці. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.20 «Фізика пучків заряджених частинок» (104 – Фізика та астрономія). – Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків, 2025.

Дисертація присвячена дослідженню селективних властивостей циліндричних резонаторів, що мають металеву поверхню із поздовжніми гофрами, для гіротронів на другій гармоніці циклотронної частоти. Отримано дисперсійне рівняння та аналітичний вираз омичної добротності для ТЕ мод у металевому циліндричному резонаторі з поздовжніми гофрами. Для врахування умови Мейкснера на ребрах гофрів для ТМ мод в коаксіальному резонаторі гіротрона з гофрованим внутрішнім провідником представлено вдосконалений метод розрахунку власних значень і полів.

Досліджена конверсія мод, викликана азимутальною періодичністю резонатора гіротрона, в залежності від кількості гофрів та їх розмірів. Встановлено, що гофри із глибиною, що дорівнює половині довжини хвилі, мають слабкий вплив на ТЕ моди циліндричного резонатора. Гофри із глибиною, близькою до чверті довжини хвилі, викликають значну конверсію ТЕ мод циліндричного резонатора в вищі просторові гармоніки, яка супроводжується зміною їх частот, омичних добротностей та коефіцієнтів зв'язку з електронним пучком.

Розроблено нелінійну самоузгоджену теорію для опису стаціонарної стадії взаємодії гвинтового пучка електронів з власними ТЕ модами гофрованого резонатора гіротрона. Для пучка і моди, які взаємодіють, наведено явний вид закону

балансу потужностей. Встановлено, що використання поздовжніх гофрів з глибиною, близькою до половини довжини хвилі робочої моди, призводить до поліпшення селективних властивостей резонаторів для гіротронів на другій циклотронній гармонії.

Ключові слова: гіротрон, гофрований резонатор, конверсія мод, стартовий струм, власне значення, добротність, омичні втрати.

ABSTRACT

Tkachova T.I. Electron-wave interaction in metal cavities with longitudinal corrugations for second-harmonic gyrotrons. – Manuscript.

Thesis for the scientific degree of candidate of physical and mathematical sciences by specialty 01.04.20 «Physics of charged particles beams» (104 – Physics and astronomy). – National Science Center «Kharkiv Institute of Physics and Technology» NAS of Ukraine, Kharkiv, 2025.

The thesis is devoted to the study of the selective properties of cylindrical cavities having a metal surface with longitudinal corrugations for the second-harmonic gyrotrons. These gyrotrons are crucial for terahertz technologies, filling the "terahertz gap" from 0.3 to 1 THz. However, their efficiency decreases at higher cyclotron harmonics due to reduced beam interaction. Competing modes further hinder gyrotron operation. To solve this problem, it is shown theoretically that the selective properties of gyrotron cavities can be improved through the use of longitudinal corrugations with mode conversion.

Using the rigorous method of spatial harmonics, a dispersion equation and an analytical expression for the ohmic quality factor for TE modes in a metal cylindrical cavity with longitudinal corrugations is obtained. The possibility of using simplified methods for analyzing corrugated structures is investigated: the impedance model, which does not take into account the interaction between spatial harmonics, and the Bloch harmonics method, which neglects the contribution of higher Fourier harmonics inside the corrugations. The conditions for their applicability are investigated and analyzed. It is shown that for arbitrary sizes and numbers of corrugations, the rigorous method of spatial harmonics is better choice for calculation the eigenvalues of TE modes in a cylindrical waveguides with longitudinal corrugations. It additionally provides high accuracy in calculating the field distribution over the cross section of a corrugated waveguide. Exceptions may be around the corrugation edges.

To take into account the peculiarity of the field near the edges of the corrugations, known as the Meixner's edge, for TM modes in a coaxial gyrotron cavity with a corrugated inner conductor, the improved method of spatial harmonics is presented. Within the framework of this method, the fields at the aperture between the waveguide channel and corrugations are re-expanded through orthogonal Gegenbauer polynomials.

The mode conversion caused by the azimuthal periodicity of the gyrotron cavity was studied, depending on the number of corrugations and their sizes. It has been defined that corrugations with a depth equal to half the wavelength have a weak effect on the TE modes of a cylindrical cavity. Corrugations with a depth close to a quarter of a wavelength cause a significant conversion of TE modes of a cylindrical cavity into higher spatial

harmonics, which is accompanied by a change in their frequencies, ohmic quality factors, and coupling coefficients with the electron beam.

A nonlinear self-consistent theory has been developed to describe the stationary stage of interaction of a helical electron beam with the eigenTE modes of a corrugated gyrotron cavity. For the electron-wave interaction in the cavity, a power balance condition was obtained. It has been determined that the presence of corrugations on the cavity surface affects not only the eigenvalues and ohmic losses, but also the coupling of TE modes with the electron beam. For corrugations with a depth equal to half the wavelength, this effect is negligible, even with a small number of corrugations. It is shown that at such a depth of corrugations in the gyrotron cavity, only an insignificant shift in the starting current of the TE mode is observed, caused mainly by ohmic losses in the corrugated wall of the cavity. When the corrugation depth is equal to a quarter of the wavelength, mode conversion to higher azimuthal Bloch harmonics becomes strong, hence significantly affecting the eigenvalues, eigenfields and ohmic losses of the TE mode. It is shown that such mode conversion leads to a weakening of the coupling between the TE mode and the electron beam. It is demonstrated that the use of a corrugated cavity with certain parameters makes it possible to expand the range of generation of a single-mode operating mode and provides the possibility of increasing the output power of the second-harmonic gyrotron.

Keywords: gyrotron, corrugated cavity, mode conversion, starting current, eigenvalue, Q-factor, ohmic losses.