

Національна академія наук України  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

**ХУТОРЯН ЕДУАРД МИХАЙЛОВИЧ**

УДК 621.385.6

**ЗБУДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КОЛИВАНЬ  
СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ТА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНІВ В  
ЕЛЕКТРОННО-ВАКУУМНИХ ПРИЛАДАХ З ПРОСТОРОВО  
РОЗВИНУТИМ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ**

01.04.04 – фізична електроніка

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2023

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова  
Національної академії наук України, м. Харків

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

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник  
**Воловічев Ігор Миколайович,**  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова  
НАН України, (м. Харків), старший науковий  
співробітник відділу теоретичної фізики

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник  
**Кушнір Володимир Абрамович,**  
Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України (м. Харків),  
начальник лабораторії дослідження і розробок  
високочастотних інжекторних систем лінійних  
прискорювачів електронів

**Захист відбудеться** 25 січня 2024 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України (61085, м. Харків, вул. Академіка Проскури, 12).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України (61085, м. Харків, вул. Академіка Проскури, 12).

Автореферат розісланий 18 грудня 2023 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Ігор ІВАНЧЕНКО

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Джерела електромагнітного випромінювання субТГц діапазону (0,1-1 ТГц) все більше застосовуються на практиці, наприклад у спектроскопії електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) динамічної поляризації ядер для ядерного магнітного резонансу (ДПЯ-ЯМР), системах ТГц бачення, діагностиці плазми, при створенні нових матеріалів, медичному лікуванні, біологічних дослідженнях, системах зв'язку та радіолокації і багато інших. Але на даний час існує так зване «ТГц провалля», що означає нестачу ТГц джерел з достатньою вихідною потужністю, діапазону частотного перестроювання, відносно невеликої вартості та габаритів тощо.

Гіротрони, що є електронно-вакуумними приладами (ЕВП) класу мазерів на циклотронному резонансі (МЦР), мають найбільший рівень вихідної потужності в субТГц діапазоні серед лабораторних приладів. Однак одним із недоліків гіротронів є відносно великі розміри та вартість, здебільшого за рахунок надпровідних магнітів, що забезпечують високу циклотронну частоту електронів. Зменшення магнітного поля (а отже й вимог до магнітів) можливо при роботі на другій гармоніці циклотронної (ЦГ) частоти. Однією з суттєвих перешкод ефективної роботи на другій ЦГ, особливо при наближенні до 1 ТГц, є конкуренція з модами, резонансними з першою ЦГ. Існує декілька способів придушення коливань на першій ЦГ, але все одно ця проблема конкуренції ще не до кінця вирішена і тому вирішення цієї проблеми є дуже актуальним. Також до недоліків гіротронів відноситься вузький діапазон частотного перестроювання. Це, по-перше, значно ускладнює задачу створення гіротрона на певну частоту через технологічні похибки, а по-друге – багато застосувань вимагають частотного перестроювання та частотної модуляції. Існуючі способи розширення діапазону перестроювання є недостатніми, й тому проблема розширення частотного перестроювання в гіротронах є дуже актуальною. При цьому існує багато чинників (похибки при виготовленні, температурні зсуви, вплив навантаження на робочі характеристики, ефекти, що призводять до гістерезису перестроювання цих приладів тощо), які перешкоджають отриманню заданих параметрів, таких як вихідна частота та потужність, особливо в ТГц діапазоні. Тому оцінка впливу цих ефектів на вихідні параметри гіротронів і створення умов для гарантованих вихідних параметрів впродовж тривалої роботи є дуже важливою проблемою.

Генератори О-типу, які засновані на черенковському випромінюванні (лампа зворотної хвилі (ЛЗХ), клинотрон) та випромінюванні Сміта-Перселла (клістрон з розподіленою взаємодією (КРВ), генератор дифракційного випромінювання (ГДВ), оротрон), мають помірні ККД у міліметровому діапазоні, але в субтерагерцовому діапазоні їхня вихідна потужність стрімко падає та є набагато нижчою за потужність гіротронів. Але порівняно з гіротронами ці прилади є доволі компактними і дешевими, а діапазон частотного перестроювання, особливо нерезонансної ЛЗХ, є доволі широким. Для підвищення потужності черенковських приладів в субТГц і ТГц діапазонах треба подолати перешкоди, що заважають ефективній електронно-хвильовій взаємодії, зокрема зменшити вплив омичних втрат електромагнітних хвиль у металевих поверхнях на зворотний

зв'язок і потужність взаємодії, збільшити ефективність виводу випромінювання, усунути конкуренцію з паразитними модами в надрозмірних структурах.

Таким чином, в дисертаційній роботі створені нові фізичні моделі, які дозволяють знайти умови ефективного збудження гібридних об'ємно-поверхневих мод в черенковському генераторі, а також коливань на першій та другій циклотронній гармоніках у просторово-розвинутих електродинамічних системах МЦР, що дало можливість вивчити і реалізувати нові підходи до підвищення ефективності зворотного зв'язку й виводу енергії в електронно-вакуумних приладах, що працюють на принципах МЦР і черенковського випромінювання для розв'язання важливої проблеми фізичної електроніки - підвищення вихідної потужності, розширення діапазону частотного перестроювання та стабільної генерації в субТГц і ТГц діапазонах.

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

Дисертаційна робота виконана у відділі дифракції та дифракційної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України (ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України) і відповідає одному з напрямків наукових досліджень (електроніка і радіофізика міліметрових і субміліметрових хвиль), затверджених постановою Президії НАН України № 30 від 11.02.2009 р. Дослідження за темою дисертації здійснювалися відповідно до плану наступних держбюджетних науково-дослідних робіт ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України: *«Електродинаміка відкритих резонансних систем та періодичних структур із композитними матеріалами; розробка когерентних джерел і вимірювальних пристроїв міліметрового та субміліметрового діапазонів електромагнітних хвиль»* (шифр «СТАРТ 2», номер держреєстрації 0107U001082); *«Електродинаміка відкритих резонансних систем, періодичних структур із композитними матеріалами та антенних систем; прямі та зворотні задачі; розробка когерентних джерел, елементної бази і вимірювальних пристроїв міліметрового та субміліметрового діапазонів електромагнітних хвиль»* (шифр «СТАРТ 3», номер держреєстрації 0111U010480); *«Генерація, посилення, детектування та розповсюдження терагерцевого випромінювання; електродинамічне моделювання та експеримент»* (шифр «СТАРТ 4», номер держреєстрації 0117U004034); *«Нові теоретичні та експериментальні методи в електродинамічному моделюванні, генерації та випромінюванні електромагнітних хвиль гігагерцевого та терагерцевого діапазонів частот»* (шифр «СТАРТ 5», номер держреєстрації 0120U100980).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є виявлення режимів і фізичних ефектів, що приводять до підвищення ефективності збудження та виводу випромінювання в електронно-вакуумних приладах із тривалою взаємодією субТГц діапазону.

Для досягнення поставленої мети було розв'язано наступні ключові задачі:

- проведення чисельного моделювання гіротрона з додатковим відбиттям з затримкою при збудженні мод з високим аксіальним індексом і при конкуренції мод на частотах першої та другої циклотронних гармонік; чисельне й експериментальне знаходження оптимальних режимів генерації та знаходження закономірностей виникаючих ефектів (розширення частотної смуги, гістерезис, кооперація мод тощо);

- теоретичне й експериментальне дослідження ефективності електронно-хвильової взаємодії, ефектів конкуренції мод у гіротроні в залежності від зсуву осі електронної гармати;
- уточнення теорії гіротрона, проведення чисельного моделювання й експериментальних досліджень електронно-хвильової взаємодії з урахуванням позарезонаторної взаємодії електронного потоку з вищими радіальними модами та з урахуванням трансформації мод;
- дослідження нестабільності параметрів випромінювання гіротронів і розроблення систем стабілізації та модуляції вихідного випромінювання;
- побудова самоузгодженої теорії збудження витікаючих і гібридних поверхнево-об'ємних хвиль електронним потоком у двовимірному наближенні;
- проведення чисельного моделювання збудження гібридних поверхнево-об'ємних мод за допомогою розробленої теорії та доступних комерційних програм і порівняння результатів у двовимірному випадку; аналіз фізичних процесів і знаходження оптимальних конфігурацій щодо електронного ККД, вихідної потужності, діапазону частотного перестроювання;
- проведення чисельного моделювання збудження гібридних поверхнево-об'ємних мод у тривимірному випадку й аналіз розподілу ВЧ полів, ефектів конкуренції мод і електронно-хвильової взаємодії.

*Об'єкт дослідження* – процеси взаємодії електронних потоків з електромагнітними хвилями в електронно-вакуумних приладах субТГц і ТГц діапазонів, процеси конкуренції мод коливальної системи, а також формування зворотного зв'язку в автогенераторах, що вивчаються.

*Предмет дослідження* – електромагнітне поле, що збуджується в електродинамічних системах електронно-вакуумних приладів електронними потоками, енергія електронно-хвильової взаємодії та вихідні параметри генерації.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених у дисертації задач використовувалися наступні методи: розв'язання рівняння руху електронів проводилося чисельно за допомогою методу Рунге – Кутта та методу великих частинок; розрахунок електромагнітного поля, що збуджено електронним потоком, а також дисперсії в електродинамічних системах, які містять гребінку, проводилися методом часткових областей і проєкційного методу.

Для аналізу збудження циліндричного хвилеводу зі слабкозмінним радіусом використовувався метод рівняння неоднорідної віброуючої струни з безвідбивними умовами.

Електронно-хвильова взаємодія досліджувалася в результаті спільного чисельного інтегрування слабконестаціонарного рівняння збудження хвиль і рівнянь руху електронного потоку з застосуванням методу кінцевих різниць та методу великих частинок. Експериментальне дослідження генерації коливань проводилося за допомогою класичних методів вимірювання частоти та спектра (з використанням інтерферометричних методів або гетеродинної схеми та спектроаналізатора). Також було застосовано класичні методи для реєстрації

сигналів (діодними, піроелектричними детекторами) і для вимірювання потужності випромінювання (калориметричними та болометричними методами).

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

1. Вперше теоретично й експериментально продемонстровано, що наявність відбиття з затримкою в субТГц гіротроні:
  - а. Спричиняє зменшення стартового струму та розширює діапазон частотного перестроювання за рахунок збудження прямої хвилі з великим аксіальним хвильовим числом;
  - б. Має сильний вплив на конкуренцію мод, приводячи до придушення генерації на другій циклотронній гармоніці модою з частотою на першій гармоніці та навпаки; також може спостерігатись кооперативна взаємодія мод із підвищенням потужності обох мод;
  - в. Приводить до складного гістерезису при зміні положення відбивача, магнітного поля та прискорювальної напруги. В режимі жорсткого збудження коливання можуть бути зірвані навіть при дуже малому зміщенні відбивача (або зміні коефіцієнта відбиття).
2. Вперше теоретично й експериментально вивчено позарезонаторну взаємодію в ТГц гіротроні при збудженні мод з вищими радіальними індексами у вихідному конусі великої довжини та з малим кутом розкриву ( $1^\circ$ ). При цьому вперше показано, що:
  - а. Позарезонаторна взаємодія спричиняє різке зростання вихідної потужності випромінювання на частоті першої циклотронної гармоніки при величинах магнітних полів, які відповідають збудженню мод із дуже високим аксіальним індексом завдяки довготривалому синхронізму з вищою радіальною модою при слабкій модуляції електронного потоку в регулярній секції робочою модою;
  - б. При розглянутій позарезонаторній взаємодії розкид пітч-фактора може спричинити значне підвищення вихідної потужності; при відбитті з затримкою цей розкид може призвести до зниження стартового струму робочої моди, а також до режиму багаточастотної генерації;
  - в. Трансформація мод при відбитті від рефлектора з затримкою спричиняє збудження «зв'язаної гарячої» моди з пониженим стартовим струмом, що погіршує умови для збудження генерації на другій циклотронній гармоніці.
3. Вперше вивчено конкуренцію мод з різними напрямками обертання при зміщенні осі електронного потоку в гіротроні. Показано, що гіротрон з аксіальним виводом випромінювання набагато менш чутливий до зміщення електронного потоку, тоді як в гіротроні з квазіоптичним конвертором мод вихідна потужність швидко падає з величиною зміщення; при цьому для максимальної вихідної потужності може потребуватися зміна полярності магнітного поля.
4. Вперше виявлено, що в МВт гіротроні з резонатором, який утворено комбінацією регулярної та слабкоконусної секцій, існування «гарячих» мод із великою добротністю спричиняє збудження більш низьких радіальних мод замість вищих при зростанні напруги в імпульсному режимі.

5. Розроблено та реалізовано алгоритми стабілізації та модуляції вихідних параметрів гіротронів з триелектродною магнетронно-інжекторною гарматою й ізольованим колектором для підвищення ефекту ДПЯ для ЯМР спектроскопії:
  - а. Вперше реалізовано модуляцію частоти зі швидкістю 20 кГц та смугою до 100 МГц в 460 ГГц гіротроні на другій ЦГ з урахуванням гістерезису по напрузі та тепловими ефектами;
  - б. Вперше практично реалізовано одночасну стабілізацію вихідної потужності та частоти субТГц гіротронів краще ніж  $\pm 1\%$  та  $\pm 10^{-6}$  відповідно.
6. Вперше теоретично знайдено ефективний режим зворотного зв'язку на гібридних об'ємно-поверхневих модах у черенковському генераторі, що є малочутливим до омичних втрат за рахунок однократного відбиття об'ємної зворотної хвилі. Знайдено співвідношення між геометричними параметрами структури та прискорювальною напругою для оптимального зворотного зв'язку.
7. Вперше знайдено конфігурацію виводу випромінювання, що забезпечує високу ефективність при збудженні гібридних об'ємно-поверхневих мод у черенковському генераторі. При цьому (на відміну від класичних ЛЗХ та ГДВ) потужність омичних втрат і вихідна потужність є співрозмірними в субТГц діапазоні (з урахуванням зниження провідності міді в цьому діапазоні за рахунок шорсткості та ін.).
8. Вперше теоретично показано ефективне збудження гібридної об'ємно-поверхневої моди перегрупованим електронним потоком, що дозволяє збільшити довжину простору взаємодії, а отже одночасно зменшити стартовий струм і збільшити вихідну потужність.
9. Вперше показано, що тривимірний розподіл синхронної гармоніки основної (по ширині) гібридної об'ємно-поверхневої моди є майже однорідним по ширині при неоднорідному розподілі об'ємної гармоніки, що сприяє ефективній взаємодії з широкими стрічковими електронними потоками; при цьому в надрозмірному резонаторі селекція основної моди (по ширині) відбувається за рахунок високої дифракційної добротності в порівнянні з вищими модами, які мають декілька варіацій поля по ширині гребінки.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у створенні та оптимізації гіротронів субТГц і ТГц діапазонів, що знайшли застосування в провідних світових наукових центрах у системах ДПЯ-ЯМР спектроскопії (Far-Infrared Research Center, Університет м. Фукуї, Японія; Institute of Protein Research, Університет м. Осака, Японія), біологічних і медичних дослідженнях (School of Medical Sciences, Університет м. Фукуї), при дослідженні нових матеріалів (Institute of Laser Engineering, Університет м. Осака, Японія; Institute of Technology, Токіо, Японія), тощо. Також одержані результати є перспективними для створення гіротронів субТГц та ТГц діапазонів з покращеними вихідними характеристиками для застосування в дослідженнях у біології, медицині, фізиці плазми тощо.

Отримані результати з дослідження черенковських генераторів на гібридних об'ємно-поверхневих модах в подальшому можуть бути застосовані для

створення компактних субТГц та ТГц генераторів з покращеними характеристиками, які є дуже привабливими для багатьох практичних і наукових застосувань.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація є узагальненням результатів досліджень, що було ініційовано автором або виконано за його безпосередньою участю. В опублікованих разом зі співавторами роботах [1-43] особистий внесок дисертанта полягав у виборі й обґрунтуванні фізичних моделей механізмів електронно-хвильової взаємодії, у проведенні чисельного моделювання та експериментальних дослідженнях, а також у формулюванні узагальнюючих висновків.

Автор брав участь в експериментальних дослідженнях і виявив особливості збудження коливань в субТГц та ТГц гіротронах [7-15, 26-33, 35, 39], особисто запропонував фізичну модель позарезонаторної взаємодії з ефектами відбиття та трансформацією мод і відповідно модифікував теоретичні рівняння та провів чисельне моделювання з подальшим фізичним аналізом та інтерпретацією отриманих результатів [12, 15, 31, 33, 39].

В роботах [8-11, 13, 26-30, 32] автором створено алгоритми та програми для управління частотою в субТГц гіротроні, а також теоретично й експериментально досліджено ефекти частотної стабілізації та модуляції, ефектів гістерезису, впливу відбитих електронів на вихідні спектри.

В роботі [3, 4] автор брав участь в теоретичному дослідженні та фізичному аналізі процесів у гіротронах при зсуві осі електронного потоку та збудженні паразитних мод у потужному імпульсному гіротроні зі складним резонатором.

Автор брав участь в обговоренні можливих застосувань гіротронів для практичних і наукових цілей, особливостей застосування з урахуванням підтримання заздалегідь визначених параметрів опромінення при змінному навантаженні, а також брав участь в експериментальних дослідженнях при застосуванні гіротронів для опромінення біологічних об'єктів, дослідженні властивостей нових матеріалів і їхньої поведінки при опроміненні [18-20, 30, 36].

В роботах [2, 5, 6, 22-24] автором особисто теоретично досліджено збудження аксіальних мод у клинотроні в залежності від омичних втрат і величини магнітного поля та разом із співавторами проведено порівняння з результатами чисельного дослідження за допомогою комерційних програм та фізичний аналіз.

Автор сформулював наукову задачу, особисто теоретично дослідив режим збудження гібридних об'ємно-поверхневих мод, брав участь в чисельному моделюванні за допомогою комерційних пакетів; особисто запропонував: режим зворотного зв'язку по об'ємній хвилі, геометрію виводу енергії, принцип підвищення ефективності збудження гібридної хвилі у разі збільшення довжини простору взаємодії та з широкими стрічковими потоками [16, 17, 21, 25, 34, 37, 38, 40-43].

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали, які представлені в дисертаційній роботі, доповідалися й обговорювалися на науковому семінарі «Теорія дифракції та дифракційна електроніка» ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, а також на таких міжнародних конференціях:



- IEEE International Vacuum Electronics Conference (Bangalore, India, 2011);
- 2012 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (Wollongong, Australia);
- IEEE International Vacuum Electronics Conference (Monterey, USA, 2012);
- International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (Kharkiv, Ukraine, 2013);
- IEEE International Vacuum Electronics Conference (Monterey, USA, 2014);
- The 6th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2014, Fukui, Japan)
- Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2014, Tucson, USA)
- Meeting Abstracts of the Physical Society of Japan 69.1 (Fukui, Japan, 2014);
- Meeting Abstracts of the Physical Society of Japan 70.1 (Tokyo, Japan, 2015);
- 2015 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz2015, Hong Kong, China)
- Meeting Abstracts of the Physical Society of Japan 71.1(Kanazawa, Japan, 2016)
- 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz 2016, Copenhagen, Denmark)
- IEEE International Vacuum Electronics Conference (Monterey, USA, 2016);
- International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (Kharkiv, Ukraine, 2016);
- The 7th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2017, Fukui, Japan)
- 2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (London, UK)
- 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz) (Paris, France)
- IEEE 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, IEEE Ukrainian Microwave Week (Kharkiv, Ukraine, 2020)
- 2020 IEEE 21st International Conference on Vacuum Electronics (Monterey, USA)
- 2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (Rotterdam, Netherlands)
- 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2021, Chengdu, China (virtual))
- IEEE International Vacuum Electronics Conference (Monterey, USA, 2022);
- 2022 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (Delft, Netherlands, virtual)
- 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (Kharkiv, Ukraine, 2022)
- 2023 IEEE 23<sup>rd</sup> International Vacuum Electronics Conference (Chengdu, China, 2023);

**Публікації.** Результати, які представлено в цій дисертації, опубліковано в **43** наукових роботах [1–43]: у **20** статтях у профільних наукових журналах [1–20], у розділі колективної монографії [21] і в **22** тезах доповідей на міжнародних конференціях [22–43].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів основного тексту з рисунками і таблицями, висновків, списку використаних літературних джерел і одного додатка. Обсяг дисертації становить 355 сторінок. Вона містить 128 рисунків (з них 21 розміщено на 19 окремих сторінках), 9 таблиць та 346 бібліографічних посилань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, основні задачі, об'єкт і предмет дослідження, наведено нові наукові результати, що виносяться до захисту, та їхнє практичне значення. Також наведено дані щодо публікацій здобувача, його особистого внеску в них і апробації отриманих результатів. Надано інформацію про структуру та обсяг дисертації.

У **розділі 1** міститься аналітичний огляд результатів досліджень з розробки електронно-вакуумних генераторів субТГц і ТГц діапазонів. В першому підрозділі розглянуто загальні проблеми, пов'язані з подоланням «ТГц провалля» та важливі застосунки ТГц генераторів. У другому підрозділі показано, що на даний час ефективність електронно-вакуумних приладів (ЕВП) О-типу на уповільнених хвилях в субТГц діапазоні стрімко падає, що обумовлено як технологічними обмеженнями, так і суттєвим зниженням ефективності електронно-хвильової взаємодії за рахунок зменшення товщини ефективного шару ВЧ поля поверхневої хвилі; труднощами у формуванні та транспортуванні щільних електронних пучків, а також суттєвим зменшенням ефективності виводу випромінювання та ростом омичних втрат з підвищенням робочої частоти. Так, наприклад, омичні втрати призводять до того, що поверхнева хвиля швидко згасає уздовж уповільнювальної системи (УС) і не відбувається зменшення стартового струму зі збільшенням довжини УС, як це є в см і мм діапазонах. Та навіть при доволі ефективному енергообміні уздовж простору взаємодії поверхнева хвиля, досягаючи початку УС, де розташовано вивід випромінювання, має дуже малу амплітуду, що відповідно спричиняє малу вихідну потужність. Одним із шляхів збільшення ефективності виводу випромінювання в мм діапазоні є збудження витікаючої хвилі, що збуджується за рахунок використання неоднорідних гребінок [1\*, 2\*], але при цьому суттєво зростає стартовий струм, особливо в субТГц діапазоні. Також проведено огляд методів щодо подолання проблем, пов'язаних з конкуренцією мод у надрозмірних електродинамічних системах субТГц діапазону, методів збільшення опору зв'язку електронного потоку з ВЧ полем, створення складних відкритих резонаторів субТГц діапазону задля створення потрібного розподілу ВЧ поля, що є ефективним для взаємодії з електронним потоком. Так, в приладах, що працюють на об'ємних хвилях (ГДВ і оротрон), розрядження коливань може

досягати у відкритому резонаторі [3\*], але це потребує доволі складних дзеркал в ТГц діапазоні, та при цьому опір зв'язку є доволі низьким. В третьому підрозділі розглянуто прилади класу МЦР, що є одними з найпотужніших генераторів в діапазоні 0,1-1 ТГц. В резонансних гіротронах перестроювання частоти дуже мале, тому важливою задачею є підвищення діапазону перестроювання робочою частотою гіротронів, що може бути реалізовано при роботі на високих аксіальних модах [4\*, 5\*], але в традиційних схемах вихідна потужність при цьому є доволі низькою. Також дуже важливим напрямком розробки ТГц гіротронів є зменшення робочого магнітного поля, що може бути досягнуто при роботі на другій циклотронній гармоніці (ЦГ) [6\*]. При цьому проблемою стає конкуренція мод на вищих циклотронних гармоніках з модами першої гармоніки [7\*], що може бути частково вирішено завдяки існуючим методам електродинамічної та електронної селекції [8\*, 9\*, 10\*]. Але зазвичай вони вузькосмугові та не завжди ефективні [11\*]. Четвертий підрозділ присвячено розглянуто сучасні та перспективні застосування електровакуумних генераторів субТГц та ТГц діапазонів та вимоги до них. Проаналізовано процеси, що заважають стабільній роботі гіротронів і досягненню гарантованих параметрів генерації, що є вкрай важливим для багатьох застосувань. Так, перешкодами стабільній роботі гіротронів можуть бути неідеальні параметри електронного потоку [12\*], геометричних розмірів електродинамічної системи [11\*] та джерел живлення [13\*], що може бути спричинено як технологічними обмеженнями, так і температурними ефектами впродовж роботи приладу. Також, такий ефект як гістерезис при перестроюванні робочих параметрів може заважати виходу гіротрона на стабільні запроектовані параметри. Показано, що в субТГц і особливо в ТГц діапазонах, актуальною задачею є виявлення допустимих відхилень від ідеальних значень та заходи щодо розширення цих допусків. В четвертому підрозділі розглянуті існуючі та перспективні застосування ТГц генераторів та вимоги до них.

В кінці першого розділу наведено короткі висновки про сучасний стан розробок електронно-вакуумних приладів субТГц діапазону та сформульовано дослідження, що спрямовано на подолання перешкод, які існують в субТГц діапазоні задля підвищення ефективності генерації випромінювання та збільшення діапазону перестроювання робочої частоти зазначених приладів, розвитку яких присвячено дисертацію.

**У розділі 2** наведено результати досліджень впливу відбиття з затримкою в субТГц гіротроні, який був розроблений в Університеті Фукуї, Японія, при роботі на моді  $TE_{-2,6}$  на частоті 394 ГГц при синхронізмі з другою циклотронною гармонікою (ЦГ) і який був призначений для застосування у спектроскопії ДПЯ-ЯМР [14\*]. Також цей гіротрон має опцію генерації коливань на частоті першої циклотронної гармоніки. У розділі наведено результати експериментальних і теоретичних досліджень. Основну увагу приділено розширенню частотного перестроювання завдяки збудженню прямих мод з високим аксіальним індексом та впливу відбиття на конкуренцію мод першої та другої циклотронних гармонік.

У першому підрозділі сформульовано основні задачі, що вирішувалися в розділі. У другому підрозділі наведено теорію збудження коливань у гіротроні з відбиттям з затримкою та наведено результати розрахунків і аналіз фізичних явищ в одномодовому режимі (окремо першої та другої циклотронних гармонік) без

урахування взаємодії мод. Із рис. 1 можна бачити, що наявність відбиття зменшує стартовий струм, особливо для високих аксіальних мод; зміна частоти з магнітним полем або з напругою стає більш ступінчастою; з'являються нові зони гістерезису при конкуренції або кооперації аксіальних мод (однієї поперечної моди). Із рис. 2, де показано залежність параметрів від положення відбивача, можна бачити можливість як перестроювання частоти коливань, так і можливість налаштування на максимальну вихідну потужність, при цьому існує гістерезис по положенню відбивача завдяки збудженню мод «довгої лінії».

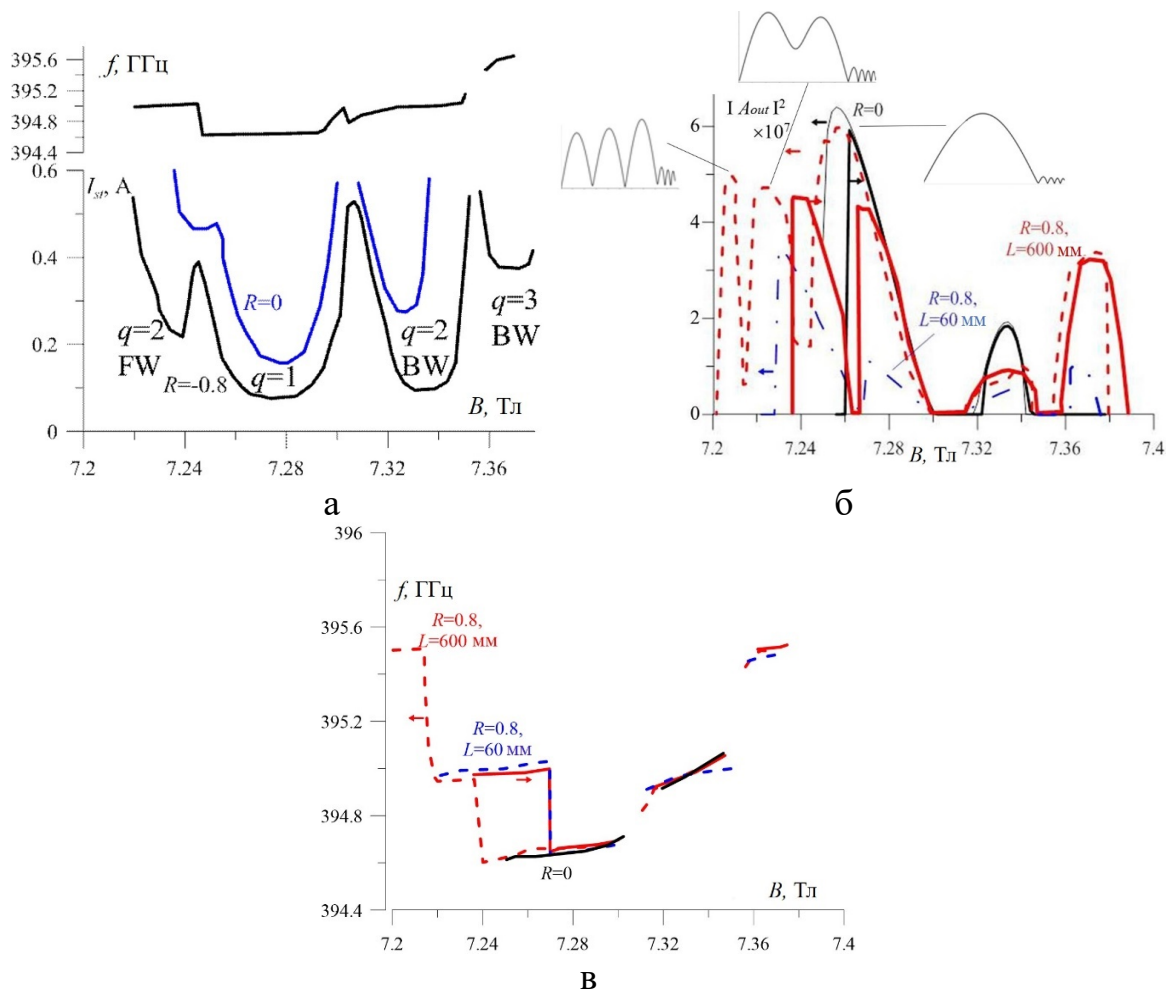


Рисунок 1 – Збудження моди  $TE_{-2,6}$  в залежності від магнітного поля з урахуванням відбиття: а) стартовий струм і частота; б) потужність (вставки показують відповідний розподіл ВЧ поля); в) частота

В третьому підрозділі теоретично розглянуто конкуренцію мод першої та другої циклотронних гармонік. Розглянуто випадки, коли коефіцієнт відбиття для обох мод як однаковий, так і різний. Показано, що до взаємодії поперечних мод ще додається взаємодія аксіальних мод довгої лінії, що призводить до складних гістерезисів. Показано, що за наявності великого коефіцієнта відбиття першої гармоніки, завдяки збудженню прямої хвилі, вона може придушити коливання на другій циклотронній гармоніці. Тому оптимальним для збудження коливань другій ЦГ є відбивач, що є майже прозорим для частотного діапазону першої ЦГ, та має великий коефіцієнт відбиття на частоті, близькій до частоти другої ЦГ.

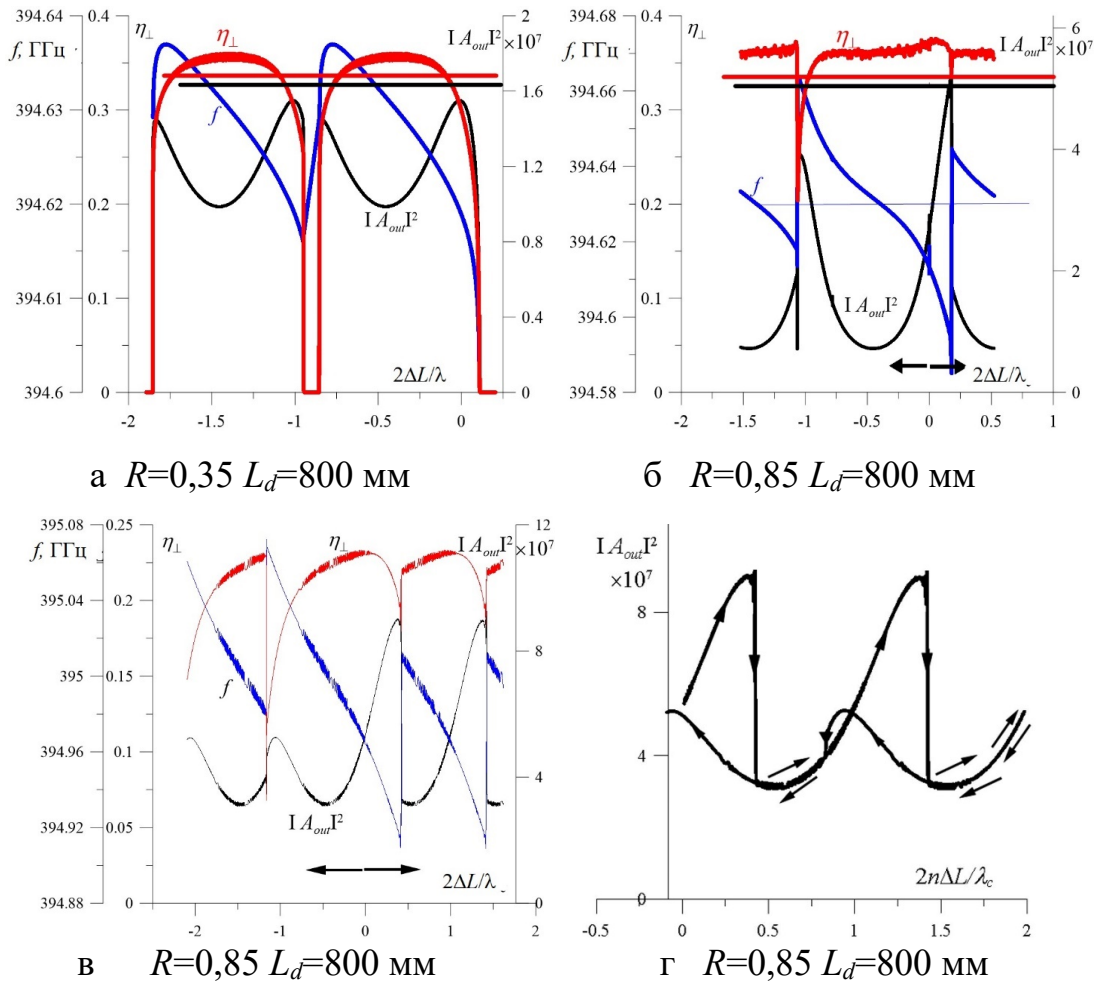


Рисунок 2 – Залежність вихідної потужності (чорна крива), частоти (синя крива) та поперечного електронного ККД (червона крива) від відстані між відбивачем і резонатором; а) – г) відповідає різним значенням  $R$  та  $L_d$ . (а, б)  $B=7,25$  Тл, (в, г)  $B=7,235$  Тл. Горизонтальні лінії відповідають випадку без відбиття ( $R=0$ )

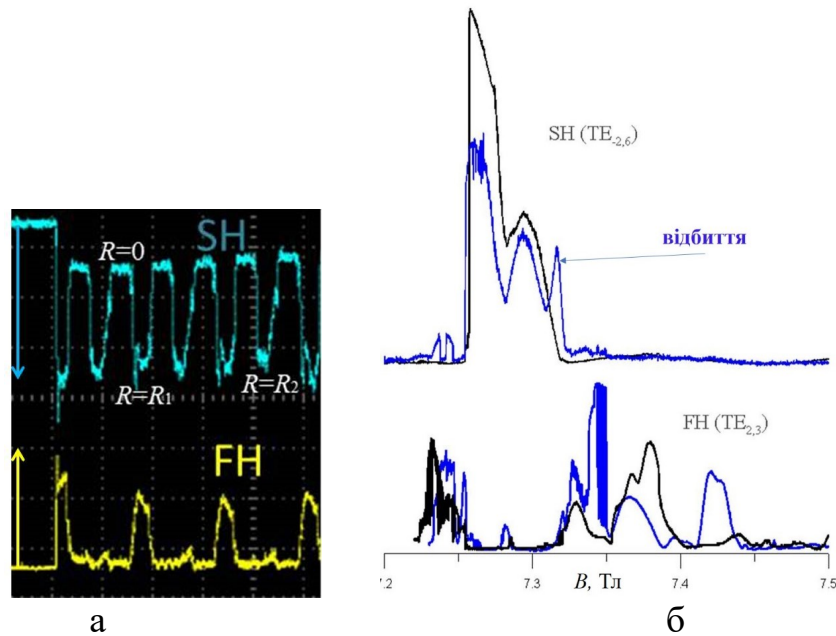


Рисунок 3 – Результати експериментальних досліджень: а) сигнали першої (FH) та другої (SH) ЦГ при періодичній зміні коефіцієнту відбиття; б) сигнали першої (FH) та другої (SH) ЦГ при зміні магнітного поля

У четвертому підрозділі наведено результати експериментальних досліджень і проведено порівняння з результатами розрахунків. Так, з рис. 3 можна бачити, що, як і передбачено розрахунками, без відбиття (або з малим коефіцієнтом відбиття) існує коливання другої циклотронної гармоніки, а мода першої циклотронної гармоніки не збуджується. За наявності великого коефіцієнта відбиття мода першої ЦГ збуджується, а потужність випромінювання другої ЦГ при цьому збільшується (кооперація мод). Рис. 3, б підтверджує збудження прямих і зворотних високих аксіальних мод як першої, так і другої ЦГ.

**Розділ 3** дисертаційної роботи присвячено дослідженню позарезонаторної взаємодії (ПРВ) у ТГц гіротроні при збудженні мод з вищими радіальними індексами у вихідному конусі. Гіротрон, що досліджується в даному розділі, призначався для роботи на другій ЦГ на частоті 0,8 ТГц в експериментах по ДПЯ-ЯМР спектроскопії та був виготовлений в Університеті Фукуї, Японія [15\*]. Відмінністю цього гіротрона були електронна селекція другої ЦГ за рахунок подвійного електронного потоку, а також дуже довга вихідна конусна секція (біля 100 мм) з кутом  $1^\circ$  задля електродинамічної селекції мод. Як показано в цьому розділі, ця відмінність дуже сильно впливає на процеси ПРВ, але при розробці цього гіротрона ефект ПРВ не було враховано, і тому при перших експериментальних дослідженнях спостерігалась непередбачувано велика потужність вищих аксіальних мод першої ЦГ, а також небажана конкуренція мод першої та другої ЦГ. Теоретичні й експериментальні дослідження, що містяться у даному розділі, надали можливість зрозуміти явища, які спостерігалися в експерименті. В першому підрозділі сформульовано мотивацію та задачу, що вирішувалась у розділі. В другому підрозділі наведено схему гіротрону та експериментальні результати збудження мод першої та другої ЦГ. Так, з рис. 4 можна бачити, що моди першої ЦГ демонструють наступну поведінку: спочатку (при менших магнітних полях) збуджується перша аксіальна мода з максимальною потужністю, потім збуджуються 2-3 наступних аксіальних моди з меншою потужністю, а далі коливання збуджуються в режимі гіро-ЛЗХ з малою вихідною потужністю.

При магнітному полі, на 3-5% вищому за синхронізм з першою аксіальною модою, раптом спостерігається неочікувано висока вихідна потужність. Частота починає змінюватися ступінчасто з невеликим кроком, що приблизно відповідає модам довгої лінії при наявності відбиття; також може спостерігатися багаточастотна генерація. Для моди першої ЦГ  $TE_{1,4}$  цей ефект припадає на діапазон магнітного поля, при якому мала б спостерігатися одночастотна генерація на другій ЦГ на моді  $TE_{8,5}$  (рис. 5). Але завдяки цьому ефекту спостерігається конкуренція мод, і вихідна потужність на другій ЦГ виявилася набагато меншою за проєктовану. У третьому підрозділі сформульовано фізичну модель ПРВ (рис. 6), що досліджується, сформульовано вирази для синхронізму для моди  $TE_{m,l}$  в прямій секції та для наступної радіальної моди  $TE_{m,l+1}$  в вихідному конусі з урахуванням змінного магнітного поля та радіусу конусу:

$$\Delta_{n+1}(z) = (\omega - \omega_H(z)) / v_{||}(z) - h_{n+1}(z) \approx 0. \quad (1)$$

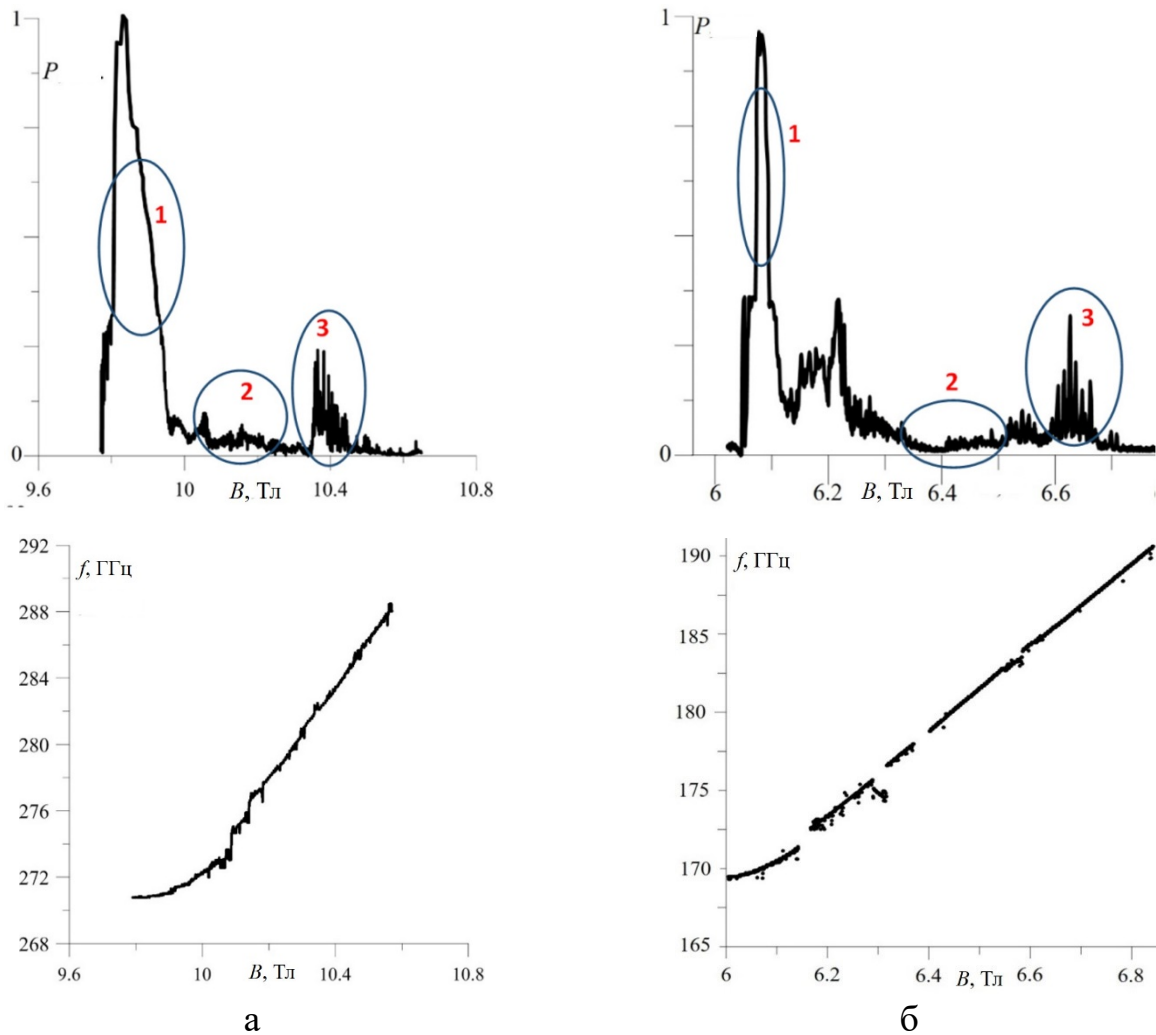


Рисунок 4 – Вихідна потужність і частота від магнітного поля: а)  $TE_{1,3}$ ,  $U_{ac}=17,0$  кВ,  $U_{an}=7,0$  кВ,  $I_B=0,4$  А; б)  $TE_{1,2}$ .  $U_{ac}=10,0$  кВ,  $U_{an}=6,9$  кВ,  $I_B=0,38$  А. “1” позначає область потужної генерації першої та низьких аксіальних мод, “2” позначає область малопотужної генерації високих аксіальних мод, “3” позначає режим потужної генерації високих аксіальних мод, що вивчається

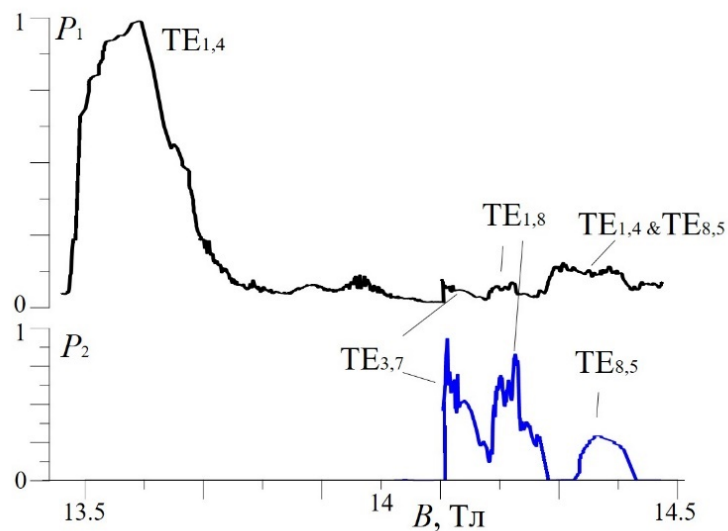


Рисунок 5 – Експериментальна залежність сигналу, що відповідає обом модам, і моди другої (SH) ЦГ при зміні магнітного поля

Визначено умови, коли довжина синхронізму наступної радіальної моди  $L_{n+1} \sim \left| \int_0^{\infty} e^{i \int_0^z \Delta_{n+1}(z') dz'} dz \right|$  є достатньою для ефективної ПРВ. Виписані рівняння для розрахунку збудження коливань з урахуванням великого часу життя електронів, декількох електронних потоків з різними радіусами та пітч-фактором, залежністю магнітного поля від повздожньої координати, а також з урахуванням відбиття та трансформації мод із затримкою.

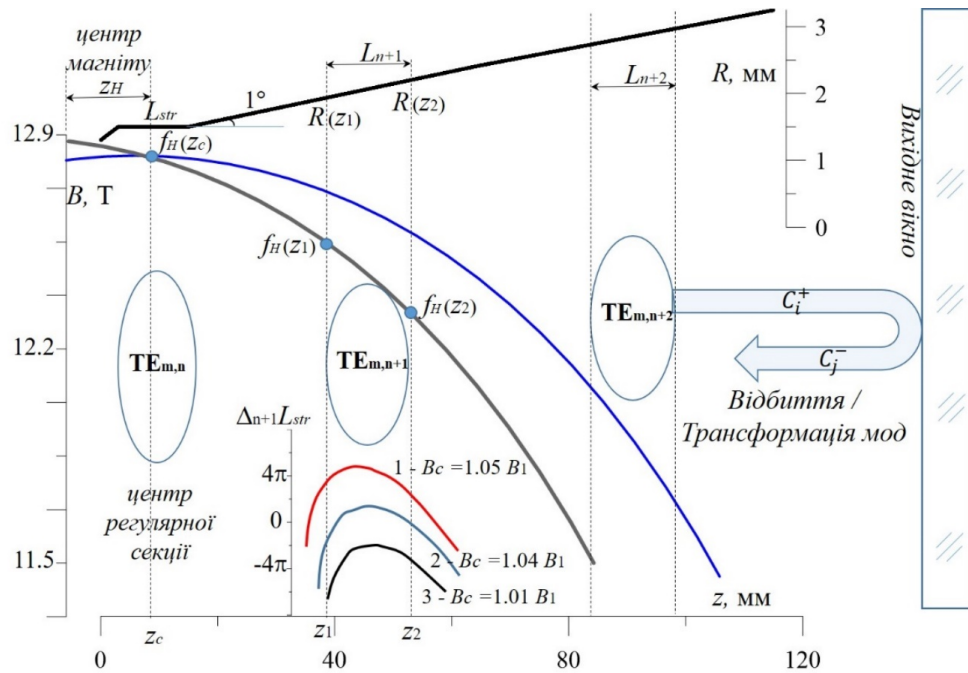


Рисунок 6 – Геометрія резонатора та розподілу магнітного поля, включаючи випадок роз'юстування. Вставка показує залежність розсинхронізму  $\Delta_{n+1}(z)$  для моди  $TE_{m,n+1}$  для декількох значень магнітного поля

У четвертому підрозділі проведено чисельний аналіз базового випадку ПРВ (існування тільки одного ЕП без розкиду пітч-фактора та при наявності відбиття без модової трансформації). Рис. 7 демонструє, що для вищої радіальної моди дійсно існує тривалий синхронізм у вихідному конусі, що призводить до збудження цієї моди. При цьому, відповідна вихідна потужність досить мала, що не може задовільно пояснити експериментальні дані. Але завдяки аналізу перехідних процесів стало зрозумілим, що однією з причин малої амплітуди вищої радіальної моди є перегрупування ЕП завдяки взаємодії з основною модою в прямій секції та наступному тривалому дрейфу ЕП. У п'ятому підрозділі розглянуто вплив розкиду пітч-фактора на ПРВ. Причина цього розглядання полягає по-перше в тому, що деякі фракції ЕП можуть бути слабомодульованими в прямій секції і тому перегрупування у вихідному конусі можна уникнути, а отже, збудження вищої радіальної моди буде більш ефективним. По-друге, багато даних експерименту опосередковано вказують на великий розкид пітч-фактора при роботі гіротрона (такі як великий анодний струм, дуже великий діапазон частотного перебудови перестроювання тощо). Як можна бачити з рис. 8, дійсно, навіть при розгляді двох фракцій з різними пітч-факторами, спостерігається значне підвищення потужності вищої радіальної моди. Тому можна припустити,



що саме розкид пітч-фактора призводить до зменшення потужності основної моди в прямій секції в режимі гіро-ЛЗХ, та до суттєвого збільшення потужності вищої радіальної моди в вихідному конусі при магнітному полі, що відповідає тривалому синхронізму.

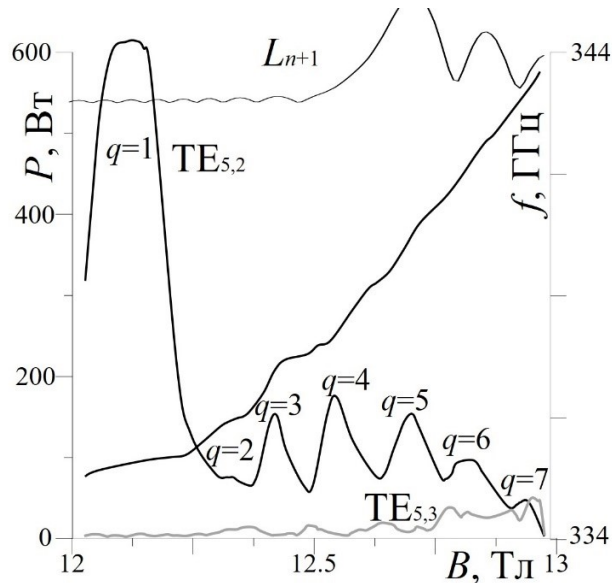


Рисунок 7 – Результати чисельного моделювання залежності вихідної потужності та частоти від магнітного поля для моди  $TE_{5,2}$  та  $TE_{5,3}$ .  $U_{ac}=10,0$  кВ,  $I_B=0,35$  А,  $g=1.5$ . Також показано залежність ефективного довжини  $L_{n+1}$

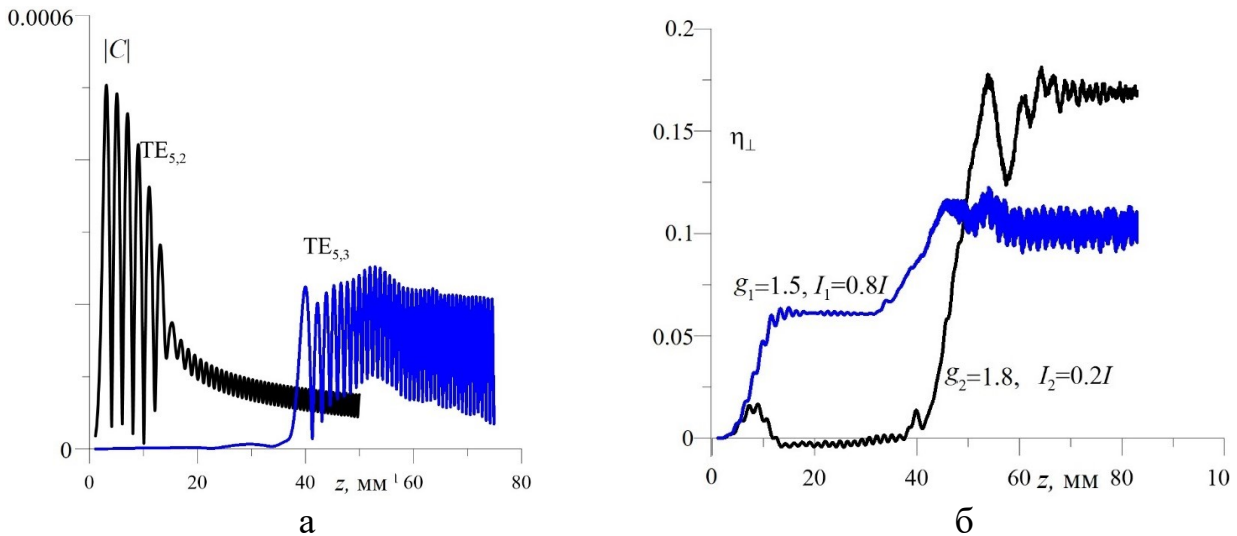


Рисунок 8 – Вплив розкиду пітч-фактору на позарезонаторну взаємодію при  $B_c=12,82$  Тл ( $q=6$ ),  $U_{ac}=10,0$  кВ,  $I_B=0,35$  А: а) поздовжній розподіл амплітуди мод  $TE_{5,2}$  та  $TE_{5,3}$ ; б) поперечний електронний ККД двох фракцій потоку

У шостому підрозділі проведено теоретичне дослідження впливу трансформації мод при ПРВ на збудження моди першої ЦГ і її впливу на конкуренцію з другою ЦГ. Умови збудження моди  $TE_{m,n}$  в прямій секції залежатимуть від моди  $TE_{m,n+1}$  у вихідному конусі, коли коефіцієнти відбиття з затримкою  $R_{ij}=C_i^-/C_j^+$  ( $i=1$  відповідає моді  $TE_{m,n}$ ,  $j=2$  - моді  $TE_{m,n+1}$ ) не дорівнюють нулю. Чисельне моделювання випадку  $R_{12}=0,3$  показало, що стартовий струм

зменшується на 15% при певних значеннях магнітного поля. Відповідний розподіл ВЧ поля показано на рис. 9. Із ростом  $R_{12}$  до певного значення вихідна потужність збільшується; але подальший зріст  $R_{12}$  призводить до збільшення амплітуди моди  $TE_{m,n}$ , але при цьому за рахунок перегрупування ЕП амплітуда моди  $TE_{m,n+1}$  починає падати. Ця мода є зв'язаною «гарячою» модою, тобто вона існує тільки за наявності ЕП з певними параметрами та при трансформації мод при відбитті від вихідного вікна. Ця зв'язана мода викликає підвищену вихідну потужність і зменшений стартовий струм. За умови роботи гіротрона на другій ЦГ зв'язана мода є шкідливою, тому що пригнічує генерацію на другій ЦГ.

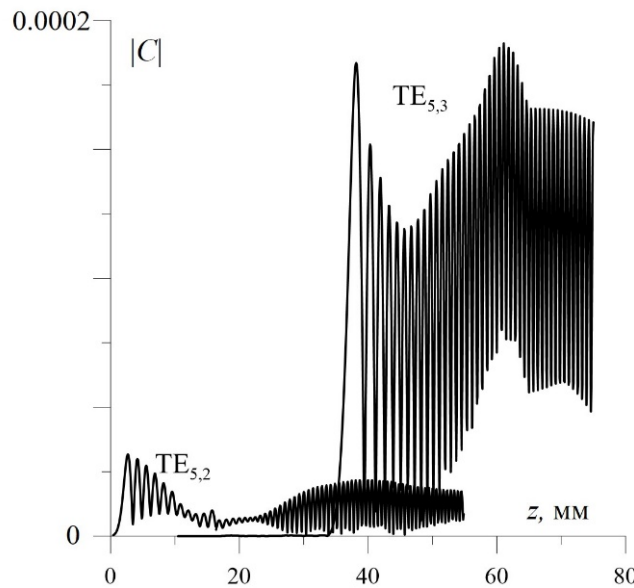


Рисунок 9 – Поздовжній розподіл амплітуди мод  $TE_{5,2}$  та  $TE_{5,3}$  при  $R_{12}=0,3$

**Розділ 4** дисертації присвячено дослідженню стабільності роботи гіротрона в заданому режимі. Під заданим режимом мається на увазі не тільки стабільність параметрів генерації в постійному режимі, але і в імпульсному режимі (стабільність від імпульсу до імпульсу, контроль збудження паразитних мод, особливо в перехідному процесі), і в режимі швидкої модуляції частоти по заданому закону. Ці виклики виникають завдяки ефектам гістерезису, роботі в жорсткому режимі, неідеальній формі прямокутного імпульсу напруги (в імпульсному режимі), можливій появі відбитих електронів, флуктуаціям напруг джерел живлення тощо. При цьому в ТГц діапазоні навіть дуже малі відхилення геометричних параметрів від заданих суттєво впливають на вихідні параметри випромінювання та їхню стабільність. Ці відхилення можуть бути внесені як при виготовленні приладу, так і завдяки тепловим ефектам упродовж роботи гіротрона.

В першому підрозділі сформульовано задачі, які вирішувалися у розділі. У другому підрозділі розглянуто збудження паразитних мод при наростанні прискорювальної напруги в потужному імпульсному гіротроні. З дисперсійної характеристики прямої секції (рис. 10) можна бачити, що впродовж наростання напруги ЕП є синхронним відразу з декількома прямими (з більшою частотою) та зворотними (з меншою частотою) модами.

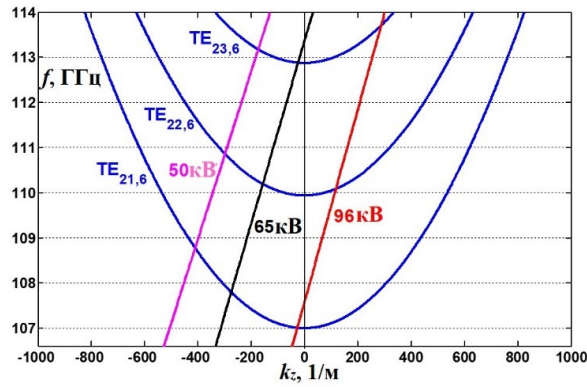


Рисунок 10 – Дисперсійна діаграма гіротрона на 1,5 МВт, 110,0 ГГц, який було розроблено для імпульсної роботи на моді  $TE_{22,6,1}$  [16\*]

Для слабкоконусного хвилеводу, який було розроблено в [16\*], знайдено складні аксіальні моди (розподіл і добротності) та стартові струми, що показано на рис. 11. Можна бачити, що розраховані за холодною моделлю стартові струми вказують на збудження вищих радіальних мод в процесі наростання напруги, тоді як результати самоузгодженої теорії вказують на збудження низьких мод завдяки зсуву ВЧ поля до початку регулярної секції. Саме така поведінка спостерігалася при експериментальних дослідженнях.

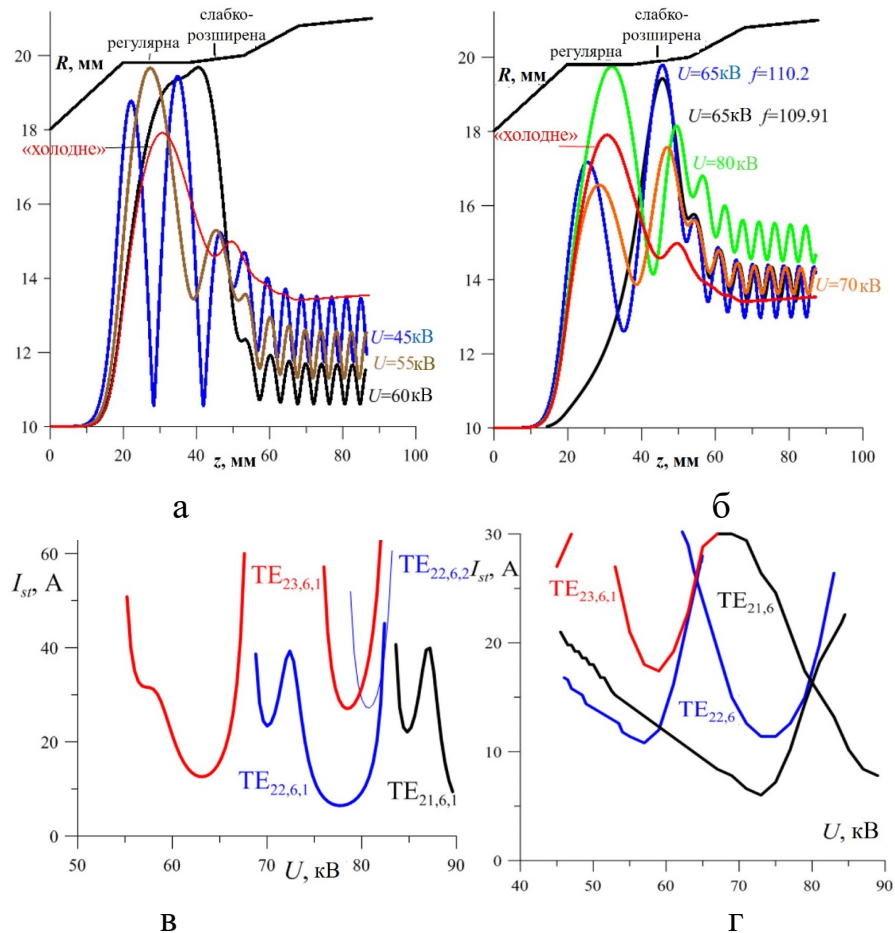


Рисунок 11 – Результати «гарячих» розрахунків гіротрона на 1,5 МВт, 110,0 ГГц, [16\*]: а), б) повздовжній розподіл моди  $TE_{22,6}$  при різних напругах; в, г) стартові струми для мод  $TE_{21,6}$ ,  $TE_{22,6}$  та  $TE_{23,6}$  (в) – «холодне» наближення, г) самоузгоджене наближення

У третьому та четвертому підрозділах розглянуто фізичні особливості модуляції частоти напругою (анодною та прискорювальною) за заданим законом в субТГц гіротроні (з частотою 0,25-0,47 ТГц), що працює на другій ЦГ. Розглянуто як режим стабілізації частоти  $f(t)=f_1$ , так і режим періодичного (гармонічного) закону модуляції  $f(t)=f_1+f_m*\sin(\Omega t)$ . Так як при модуляції напругами разом із частотою змінюється й вихідна потужність, то розглянуто також закон модуляції потужності та спектри вихідного сигналу. Перший випадок  $f(t)=f_1$ ,  $P(t)=P_1$  досягнуто завдяки одночасній амплітудній і частотній стабілізаціям методом ПД анодною та прискорювальною напругами і струмом розжарювання на рівні краще ніж  $\pm 10^{-6}$  для частоти і  $\pm 1\%$  потужності протягом довготривалого часу (рис. 12). Ширина спектральної лінії може збільшуватись за рахунок появи відбитих електронів, що виникають при збільшенні анодної напруги за рахунок розкиду пітч-фактора, а також, можливо, за рахунок неідеального юстування електронної гармати.

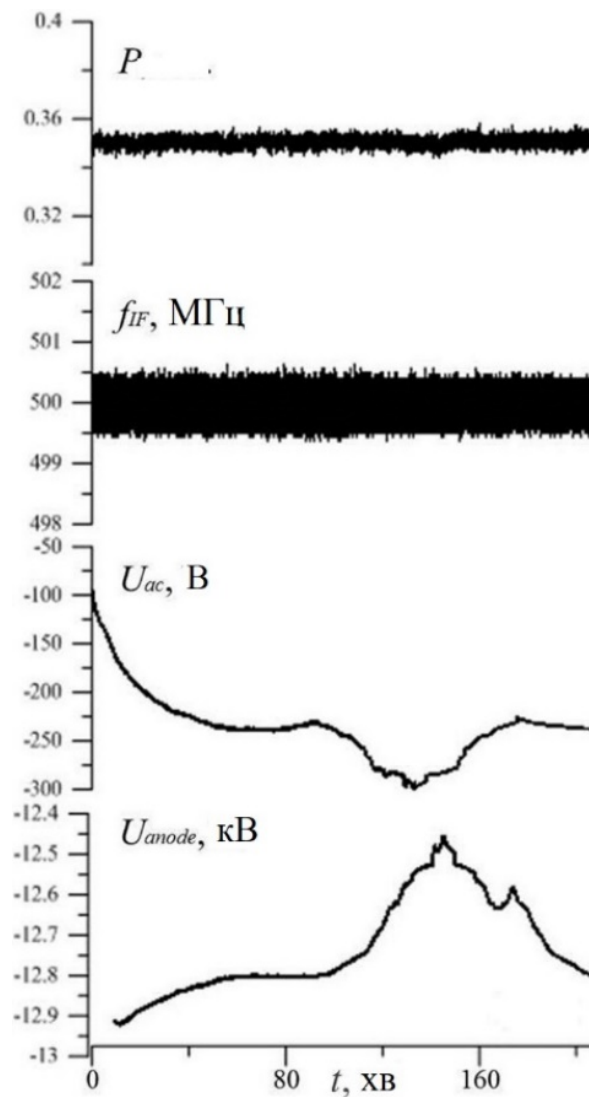


Рисунок 12 – Одночасна стабілізація потужності та частоти за допомогою керування анодної та прискорювальної напруг. Відхилення потужності становить  $\pm 1\%$ , девіація частоти становить  $\pm 0,4$  МГц.  $f=nf_{LO}+f_{IF}$ ;  $f_{LO}=38,32$  ГГц,  $n=12$

При модуляції напруги за гармонічним законом виникає частотна модуляція, що показано на рис.13.

Ширина модуляції залежить від добротності резонатора, та для основної аксіальної моди з достатньою потужністю не перевищувала 80-100 МГц для центральної частоти 460 ГГц. Також показано, що за рахунок гістерезису ефективна та стабільна модуляція можлива при неперевисенні амплітуди напруги рівня гістерезису. Швидкість модуляції, в основному, залежить від ємності між корпусом гіротрона та ізольованим колектором, а також параметрами джерела живлення.

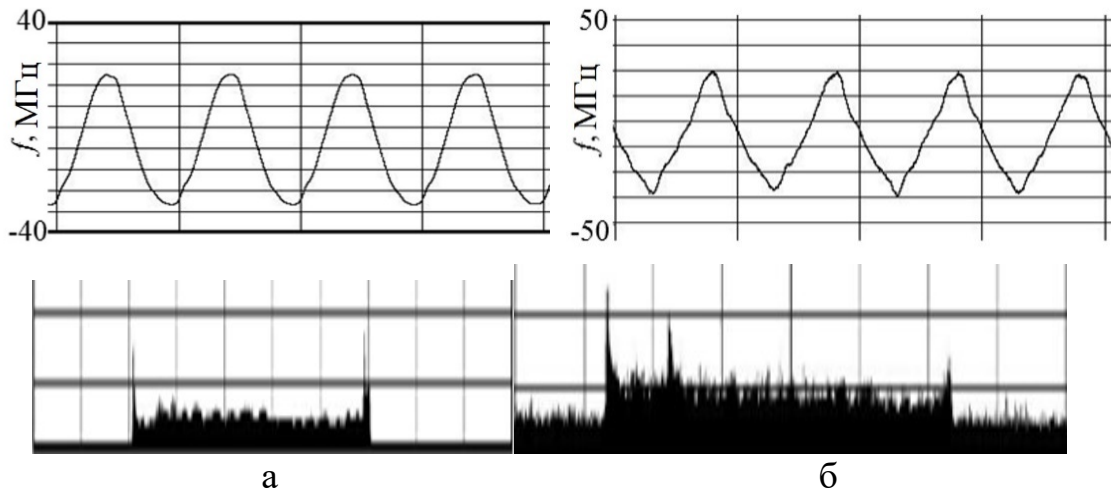


Рисунок 13 – Залежність частоти від часу та спектр генерації при модуляції напруги,  $f_m=10$  кГц,  $\Delta V_{ac}=1$  кВ; а) синусоїдальна, б) трикутна

У п'ятому підрозділі досліджено вплив зсуву осі електронної гармати відносно осі резонатора на параметри генерації гіротрона. Наведено теоретичні рівняння взаємодії аксіально несиметричного електронного потоку та збудження двох мод, що різняться напрямком обертання як в м'якому, так і в жорсткому режимах.

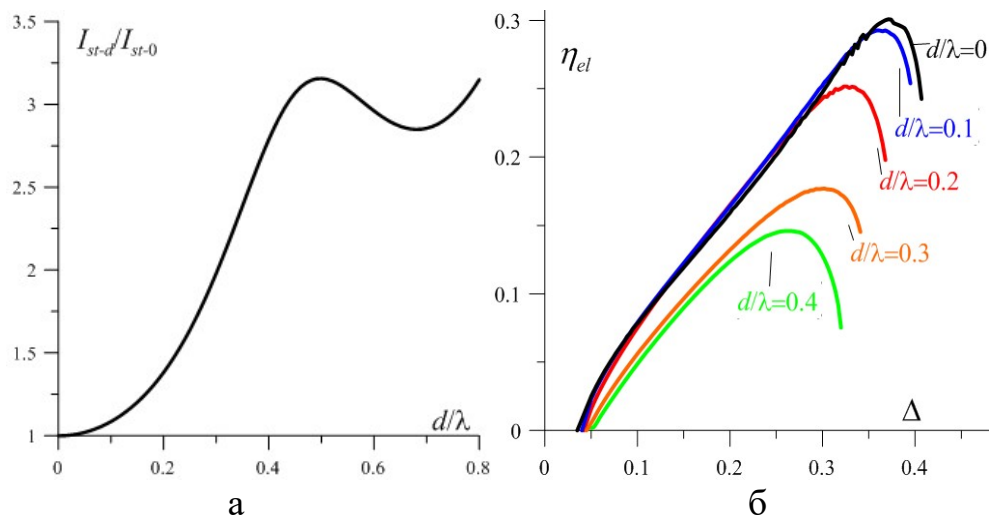


Рисунок 14 – Вплив зсуву осі електронного потоку в одномодовому наближенні: а) зміна стартового струму при зміщенні електронного потоку, б) залежність електронного ККД від розсинхронізму при різних зміщеннях

Описано параметри 335 GHz гіротрона на першій ЦГ, розробленого в Університеті Фукуї, Японія [12\*], в якому була можливість зсуву осі електронної гармати відносно осі резонатора. Як можна бачити з рис. 14, при зсуві осі потоку на 0,3 мм стартовий струм моди  $TE_{331}$  підвищується приблизно в два рази, максимальний ККД зменшується, а оптимальний розсинхронізм зменшується.

Аналіз вказує на те, що ККД зменшується за рахунок як зменшення середнього імпедансу зв'язку ЕП, так і за рахунок збільшення стандартного відхилення імпедансу, що призводить до того, що оптимальні умови різні для різних фракцій ЕП. Це пояснює причину того, що чутливість до зсуву ЕП в м'якому режимі менша, ніж в жорсткому. Результати моделювання конкуренції (кооперації) мод  $TE_{\pm 331}$  показано на рис. 15, з якого можна бачити, що при деяких  $\Delta$  конкуренція з боку моди  $TE_{3,3,1}$  призводить до ще меншої інтенсивності основної моди, але також існує  $\Delta$ , при якому збудження моди  $TE_{3,3,1}$  приводить до збільшення інтенсивності основної моди.

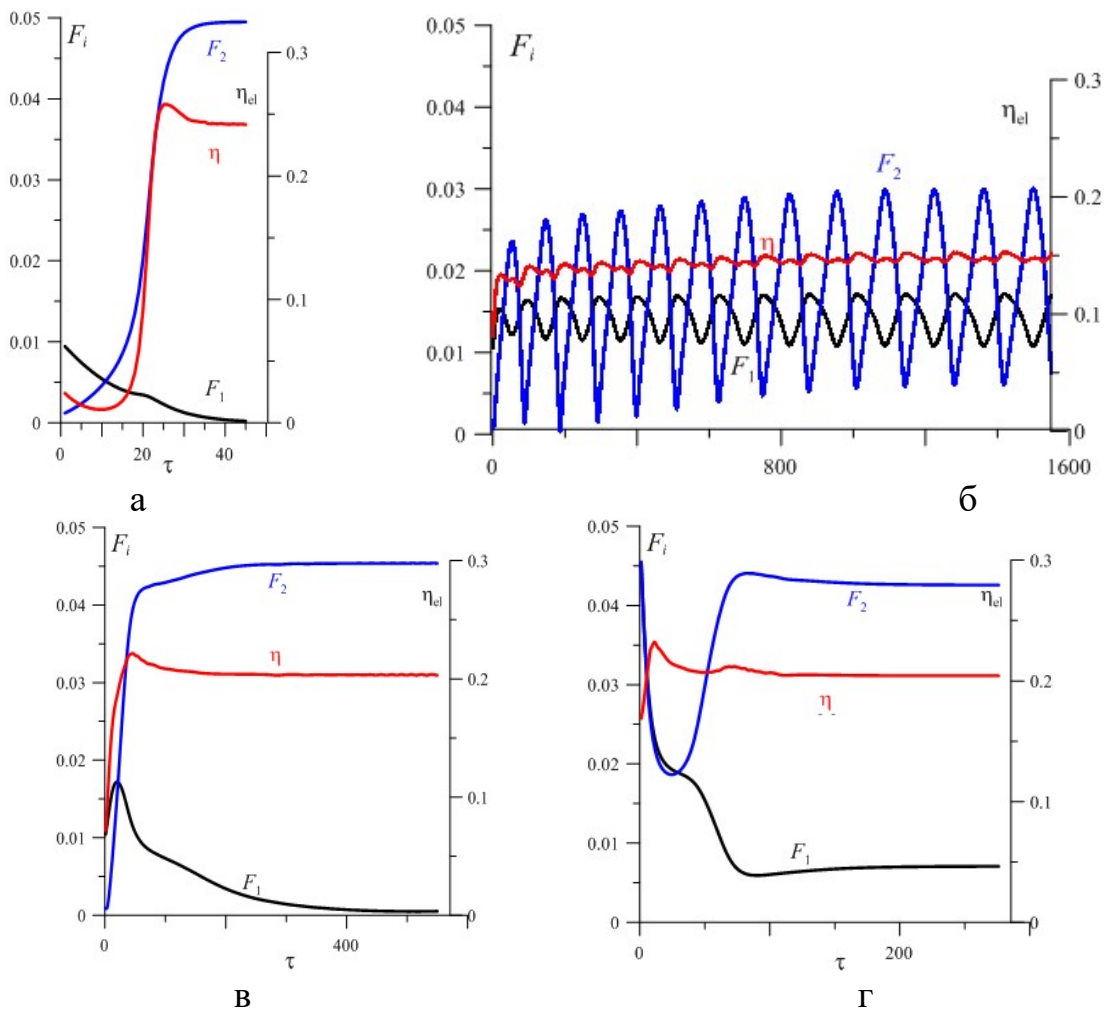


Рисунок 15 – Електронний ККД і амплітуда мод  $TE_{\pm 3,3}$  в залежності від часу для різних значень зміщення осі електронного потоку: а)  $d/\lambda = 0$ ; б)  $d/\lambda = 0,42$ ; в), г)  $d/\lambda = 0,25$

Також можна бачити, що при цьому стаціонарний режим залежить від початкових умов, тобто є ефект гістерезису. Загальна потужність взаємодії з обома модами набагато менш чутлива до зсуву осі ЕП (рис. 16), тому можна

зробити висновок, що гіротрон з аксіальним виводом, де важлива тільки загальна потужність, набагато менш чутливий до зсуву ЕП порівняно з випадком, коли встановлюється квазіоптичний конвертор, коефіцієнт перетворення основної моди в гаусовий пучок якого близький до 1, а моди зворотного напрямку близький до 0. При доволі великих  $\Delta$  в такому гіротроні треба поміняти полярність магнітного поля для збільшення вихідної потужності.

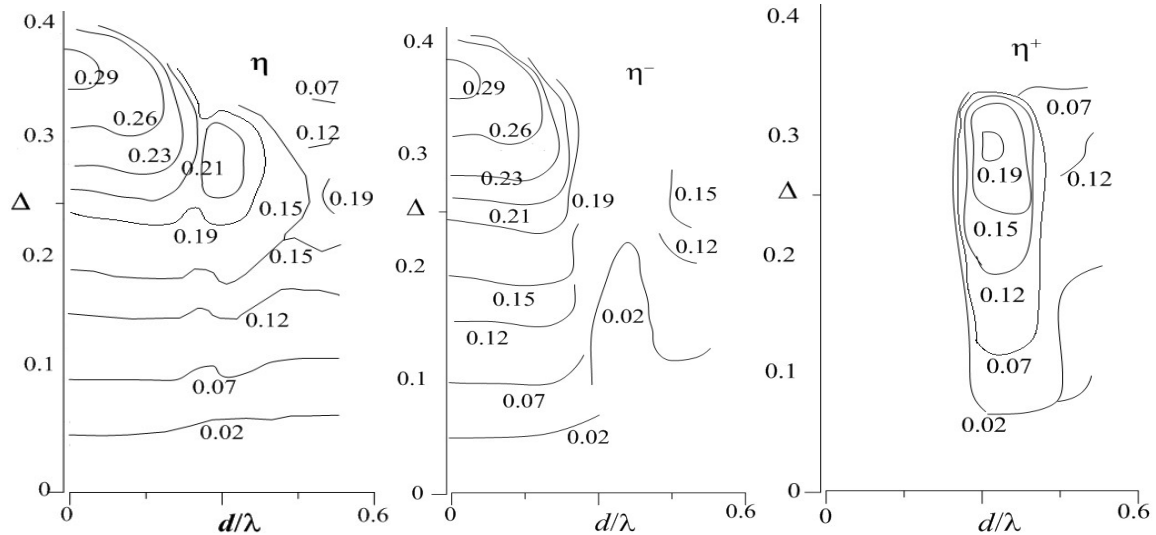


Рисунок 16 – Контури ККД (загальний  $\eta$ ,  $TE_{-33}$   $\eta^-$  та  $TE_{+33}$   $\eta^+$ )

**Розділ 5** дисертації присвячено двовимірному теоретичному та чисельному дослідженню підвищення ефективності збудження гібридних об'ємно-поверхневих мод електронним потоком в ТГц діапазоні. У першому підрозділі підкреслено актуальність задач, що вирішувалися у розділі. У другому підрозділі розглядається вплив омичних втрат на роботу клинотрона в режимі поверхневих хвиль в субТГц діапазоні. Показано, що при збільшенні втрат наближення фіксованої структури поля стає недійсним і амплітуда зворотної хвилі суттєво згасає при поширенні до вихідного хвилеводу, що суттєво знижує вихідну потужність навіть при доволі великій потужності електронно-хвильової взаємодії.

У третьому підрозділі наведено рівняння, які було застосовано для розрахунку як власних мод, так і збудження електромагнітних хвиль модульованим електронним потоком, що рухається над неоднорідною гребінкою. Наведено рівняння як для випадку відкритої гребінки, так і гребінки з верхньою стінкою, що формує закритий хвилевід. Завдяки розкладанню в інтеграл Фур'є отримано розв'язок для збудження поля кінцевим по довжині ЕП, що разом із розв'язанням рівняння руху складає самоузгоджену систему рівнянь:

$$I(z) = A(z)e^{ih_e z - i\omega t}, \quad 0 < z < L_g;$$

$$A(z) = \int_{-\infty}^{\infty} A(k_z) e^{ik_z z} dk_z, \quad A(k_z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{L_g} A(z) e^{-ik_z z} dz; \quad (3)$$

$$E_d = e^{ih_e z} \int_{-\infty}^{\infty} A(k_z) e^{ik_z z} \sum_n G(h_e + k_z + \frac{2\pi n}{L}) e^{i\frac{2\pi n}{L} z} e^{\sqrt{k^2 - (h_e + k_z + \frac{2\pi n}{L})^2} a} dk_z;$$

$$P = \frac{1}{2} \int_0^{L_1} jE_z^* dz.$$

В четвертому підрозділі розглянуто збудження витікаючих хвиль у випадку відкритої гребінки. Проаналізовано просторовий спектр струму (ЕП модульованого по швидкості на початку простору взаємодії) в лінійному наближенні та показано (рис. 17, а), що як і в режимі Сміта-Парселла, зворотний вплив власного поля, розсіяного на гребінці, спричиняє підсилення повільної хвилі просторового заряду та згасання швидкої хвилі просторового заряду.

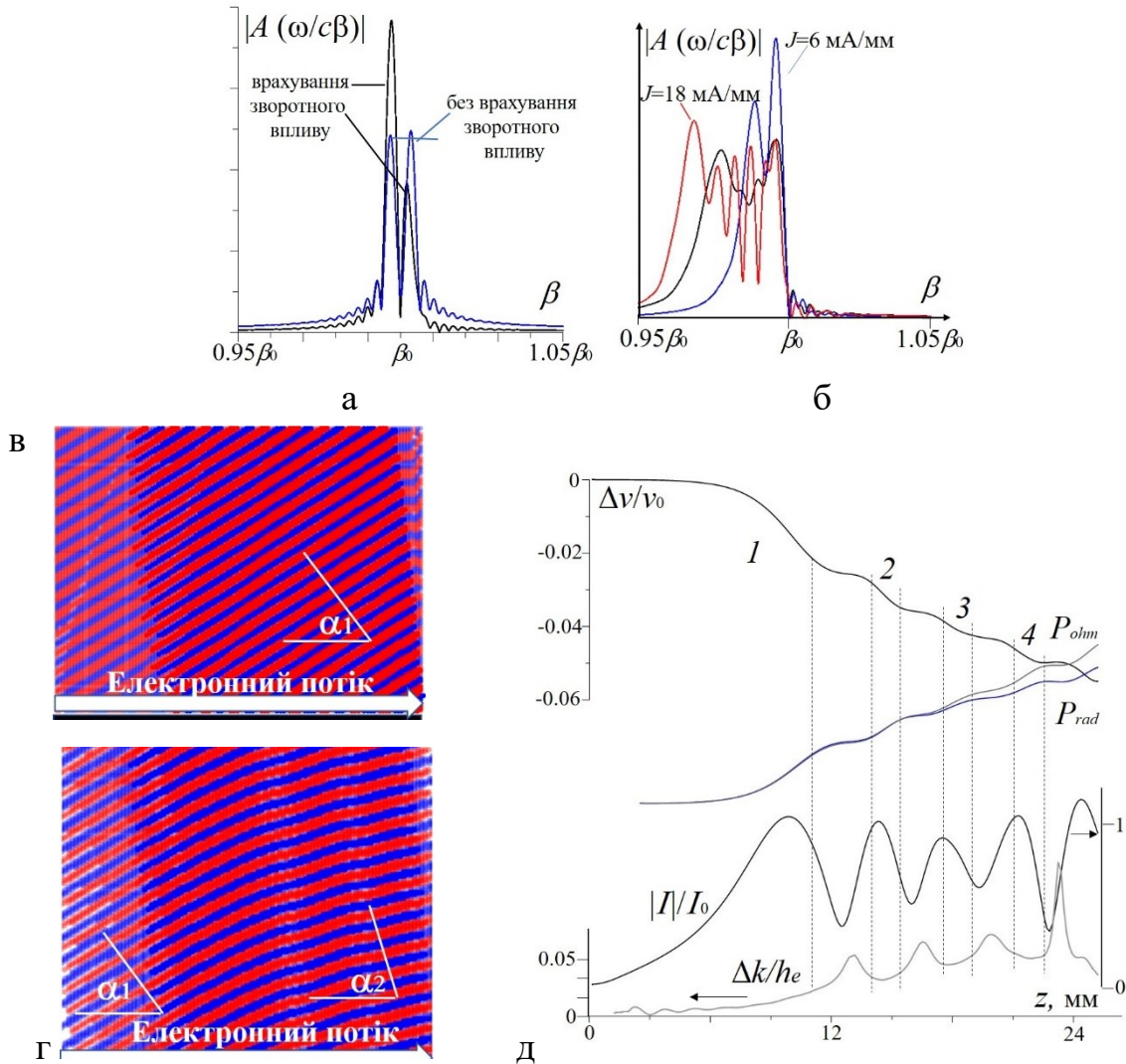


Рисунок 17 – Результати розрахунку збудження витікаючої хвилі модульованим електронним потоком (прискорювальна напруга  $U=17,8$  кВ, струм  $J=18,0$  мА/мм, частота модуляції  $f=0,66$  ТГц): а, б) просторові спектри ВЧ струму в лінійному та нелінійному режимах; в, г) розподіл ВЧ поля в лінійному та нелінійному режимах; д) повздовжній розподіл середньої швидкості електронів, нормованої потужності випромінювання та омичних втрат  $P_{rad}$  та  $P_{ohm}$ , хвильового числа  $\Delta k$  і ВЧ струму  $|I|$

При збільшенні струму або довжини простору взаємодії просторовий спектр розширюється в сторону більших значень (рис. 17, б). При цьому середня швидкість електронів поводить наступним чином: різко падає (квадратично),



коли еквівалентне хвильове число майже не змінюється (рис. 17, в). На інтервалах «розгруповання», коли хвильове число швидко змінюється, середня швидкість майже не падає. Потужність випромінювання витікаючої хвилі поводитья дуже схоже, із чого можна зробити висновок, що на інтервалах  $\Delta k \approx const$  витікаюча хвиля випромінюється когерентно, що і спричиняє значне сповільнення електронів. При цьому зріст  $\Delta k$  з довжиною вказує на імовірне зменшення кута випромінювання згідно з дисперсією. Розрахунок, згідно з рівнянням (3), дійсно вказує, що в лінійному режимі випромінювання витікаючої хвилі близьке до плоскої хвилі, а в нелінійному режимі кут випромінювання залежить від координати  $z$  (рис. 17, з). З рис. 17, д випливає, що витікаюче випромінювання з областей, де  $\Delta k \approx const$ , є когерентним з підвищеною інтенсивністю, що спричиняє істотне зменшення середньої швидкості потоку на цих ділянках.

У п'ятому підрозділі розраховані дисперсійні характеристики хвилеводу з неоднорідною гребінкою. Проведено класифікацію режимів взаємодії електронного потоку з гібридними об'ємно-поверхневими модами (рис. 18).

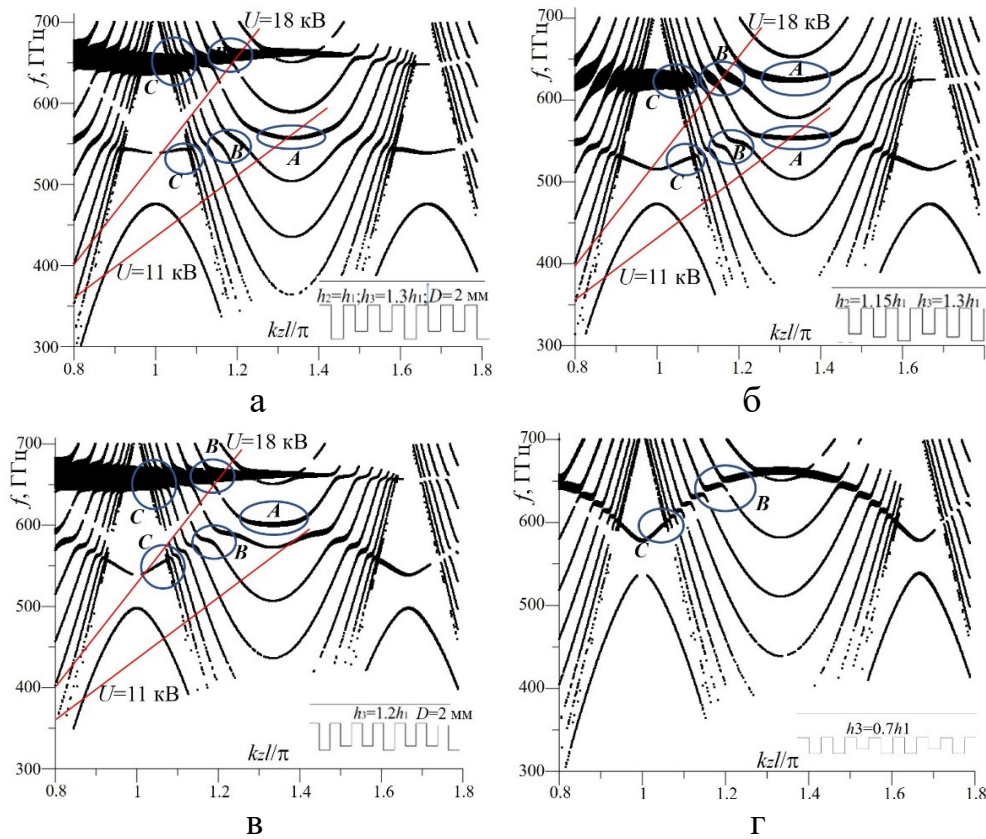


Рисунок 18 – Дисперсійні характеристики хвилеводів з неоднорідною триступеневою гребінкою з періодом  $l = 0,07$  мм та регулярною глибиною  $= 0,09$  мм,  $D = 2,0$  мм. а)  $h_3 = 1,3h_1$ ,  $h_2 = h_1$ ; б)  $h_3 = 1,2h_1$ ,  $h_2 = h_1$ ; в)  $h_3 = 1,3h_1$ ,  $h_2 = 1,15h_1$ ; г)  $h_3 = 0,7h_1$ ,  $h_2 = h_1$ . Области A-D відповідають різним режимам гібридних хвиль

По-перше, ці режими відрізняються відношенням енергії об'ємної та поверхневої хвиль  $R = W_{bl}/(W_{bl} + W_{surf})$  і  $U_{bl} = P_{bl}/P$ ,  $U_{surf} = P_{surf}/P$  ( $P_{bl}$  і  $W_{bl}$  потік потужності й енергія об'ємної гармоніки, а  $P_{surf}$ ,  $W_{surf}$  - поверхневої хвилі). Вочевидь, для чисто поверхневої моди  $R=0$ ,  $U_{bl}=0$ ,  $U_{surf}=1$ , а для чисто об'ємної моди  $R=1$ . По-друге, вони відрізняються кутом випромінювання об'ємної хвилі (з

рис. 18 та з подальшого розгляду можна бачити відмінність режимів збудження коливань при різних кутах). По-третє, режими відрізняються взаємними швидкостями електронного потоку (і відповідно синхронної просторової гармоніки) й об'ємної та поверхневої хвиль. Так, в режимі зворотного зв'язку по зворотній хвилі існує три варіанти взаємної швидкості об'ємної та поверхневої хвиль. Те ж саме дійсне і для режиму підсилення.

Результати чисельного моделювання режиму зворотного зв'язку по об'ємній зворотній хвилі, що випромінюється під кутом  $120^\circ$ - $150^\circ$  до поверхні гребінки (режим *B* на рис. 18), при прямій поверхневій хвилі показано на рис. 19-22. Для підтвердження того, що зворотний зв'язок забезпечується тільки об'ємною хвилею, було проведено моделювання гребінки з закороткою посередині (рис. 19, *a*), яка є перешкодою для поширення поверхневої хвилі та не впливає (особливо при даних  $L$  та  $D$ ) на об'ємну хвилю.

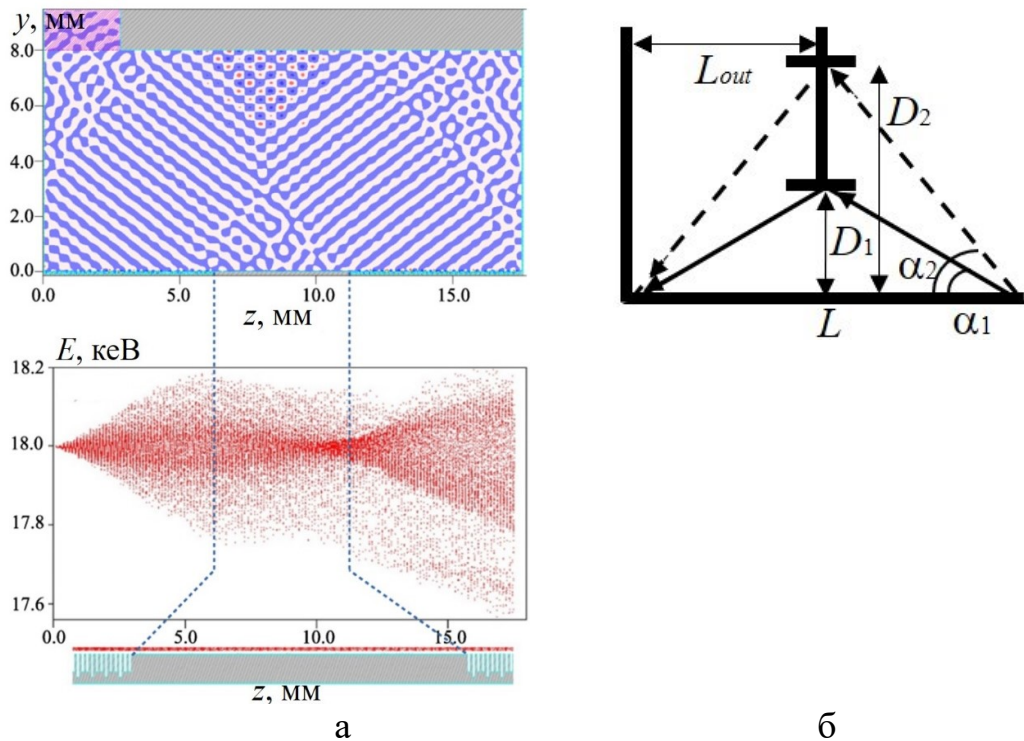


Рисунок 19 – Збудження гібридної хвилі у разі закорочення неоднорідної гребінки в центрі: а) розподіл ВЧ поля та енергії електронів, б) схема формування зворотного зв'язку по зворотній об'ємній хвилі в наближенні геометричної оптики

Для грубої оцінки наявності зворотного зв'язку у наближенні геометричної оптики, як впливає з рис. 19, б,

$$L_g \tan \alpha \geq 2D. \quad (4)$$

Моделювання в MAGIC2D підтверджують, що при  $D$ , більшим за величину, що впливає з (4), коливання не самозбуджуються. Чисельні розрахунки, згідно з рівнянням (3), для збудження хвиль заданим електронним потоком довжини  $L_g$  в залежності від висоти  $D$  (рис. 20) також вказують, що резонансна взаємодія

можлива, коли виконується нерівність (4). Також показано, що коли в (4) є приблизна рівність правої та лівої частин, відбувається однократне відбиття від верхньої стінки. Цей режим є дуже привабливим з декількох міркувань. По-перше, цей режим мало чутливий до омичних втрат навіть при великій довжині простору взаємодії (на відміну, наприклад, від режиму чисто поверхневої хвилі, який суттєво згасає при поширенні уздовж гребінки), що дозволяє суттєво зменшити стартовий струм. По-друге, з наближення геометричної оптики також впливає приблизний вираз для максимальної ширини виводу випромінювання, що не зменшує ефективність електронно-хвильової взаємодії:  $L_{out}\tan\alpha \leq D$ . Так, промінь, що відбивається від краю верхньої стінки, падає на початок гребінки. Моделювання в MAGIC2D показують, що, дійсно, при збільшенні ширини виводу вихідна потужність збільшується, тоді як потужність електронно-хвильової взаємодії майже не змінюється. За більшої ширини потужність взаємодії починає зменшуватися аж до зриву коливань при  $L_{out} = 8$  мм (рис. 21). Розгляд можливості збільшення довжини простору взаємодії без насичення потужності випромінювання проведено для цього режиму (однократного відбиття об'ємної хвилі від верхньої стінки), результати моделювання за допомогою пакету MAGIC2D показано на рис. 22. Можна бачити підтвердження теоретичних розрахунків (підрозділ 4). Так, при збільшенні струму оптимальна висота  $D$  збільшується згідно (4) за рахунок зміни кута об'ємної хвилі та може перевищувати величину, при якій виконується нерівність (4), що вказує на гістерезис коливань по  $D$ .

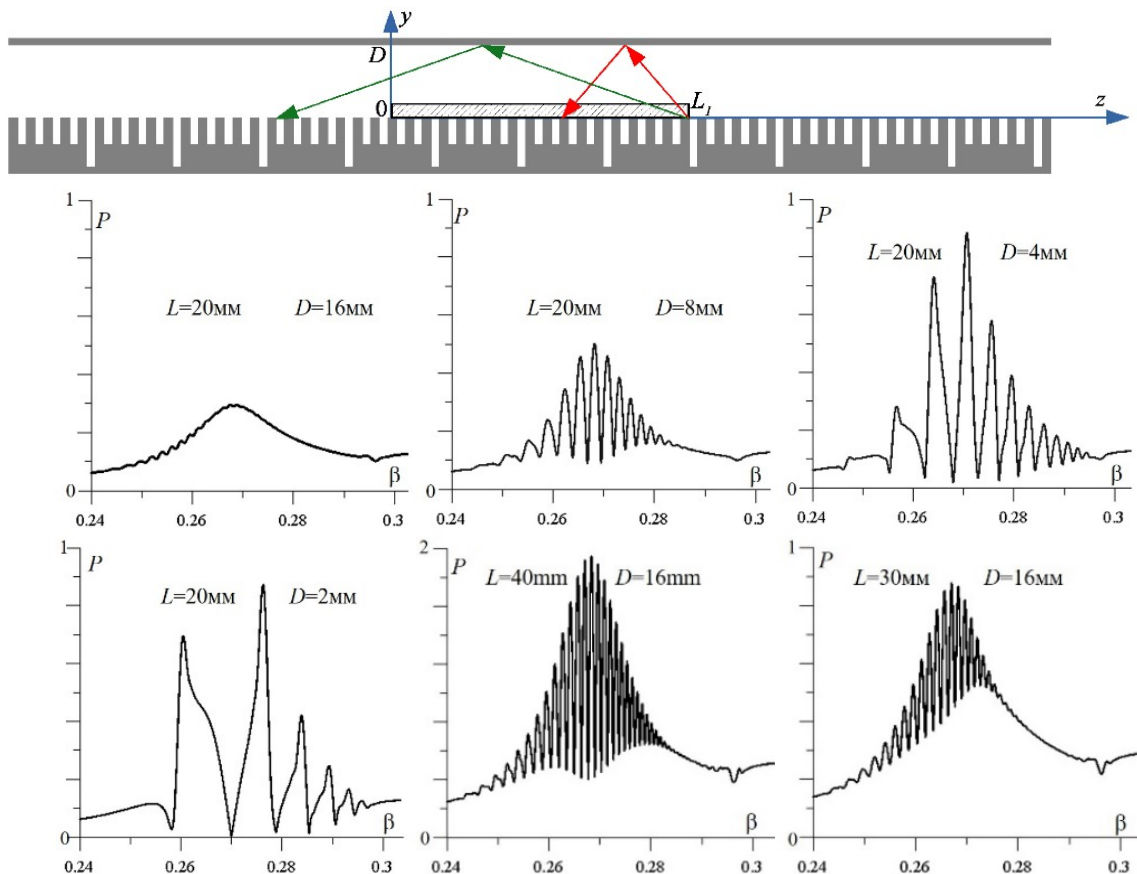


Рисунок 20 – Потужність взаємодії потоку з ВЧ полем, що збуджено модульованим потоком ( $f=0,655$  ТГц) кінцевої довжини  $L_1$  від швидкості потоку

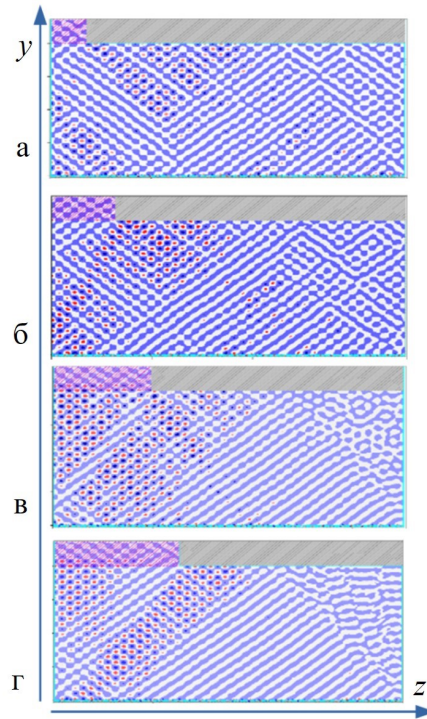


Рисунок 21 – Розподіл ВЧ поля гібридної хвилі в стаціонарному режимі при різній ширині виводу випромінювання при  $D = 8,0$  мм та  $U=18,6$  кВ: а) 1,75 мм,  $P_{\text{out}} \cong 15$  Вт,  $P_{\text{loss}} \cong 75$  Вт; б) 3,2 мм,  $P_{\text{out}} \cong 26$  Вт,  $P_{\text{loss}} \cong 78$  Вт; в) 4,9 мм,  $P_{\text{out}} \cong 45$  Вт,  $P_{\text{loss}} \cong 40$  Вт; г) 6,3 мм,  $P_{\text{out}} \cong 40$  Вт,  $P_{\text{loss}} \cong 25$  Вт

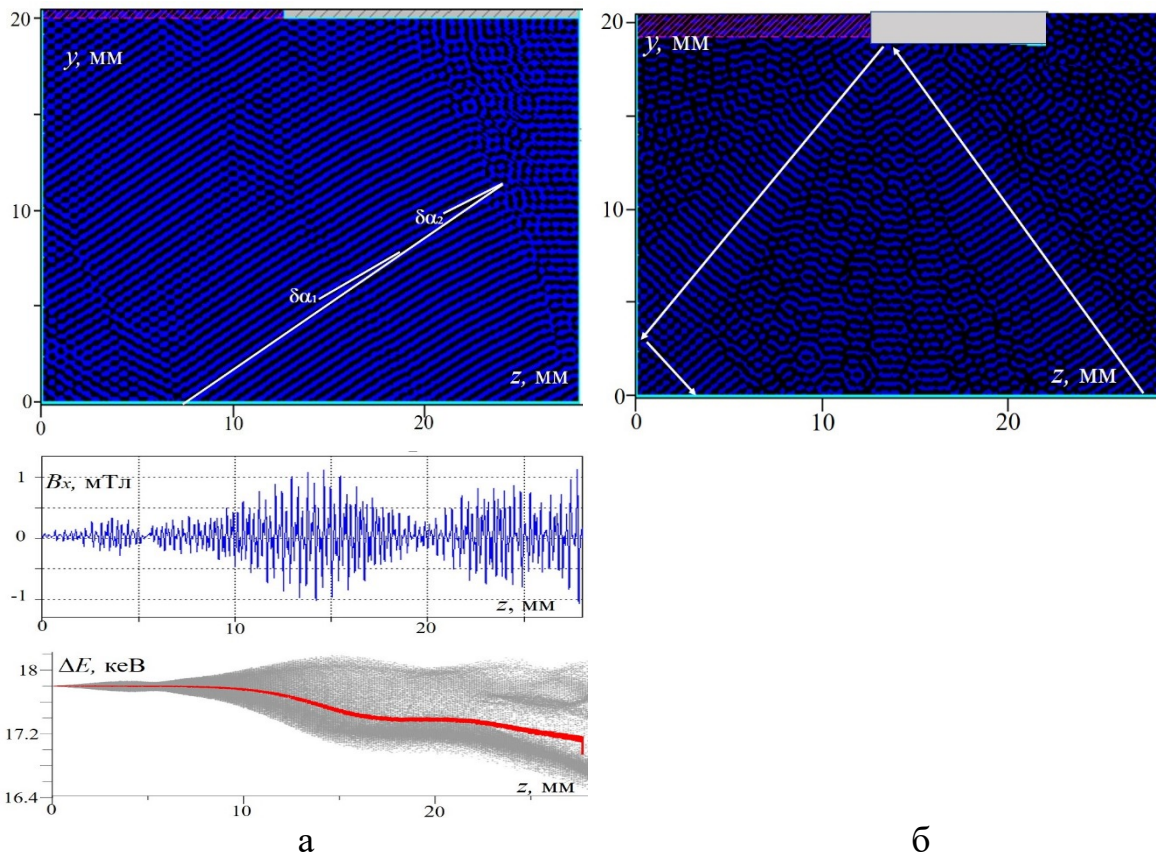


Рисунок 22 – Результати моделювання за допомогою пакету MAGIC2D: а) розподіл ВЧ поля (дво- та одновимірний) в стаціонарному режимі та залежність енергії електронів у режимі жорсткого збудження при  $D=20$  мм; б) розподіл ВЧ поля при перехідному процесі в режимі м'якого збудження

Режим генерації, коли  $k_{z(-2)} \approx 0$  (тобто випромінювання об'ємної хвилі є близьким до нормалі до гребінки подібно до ЕВП, таких як ГДВ і оротрон -режим *A* на рис. 18) показано на рис. 23. Різниця з режимом ГДВ полягає в тому, що в ГДВ існує тільки об'ємна хвиля, а ЕП взаємодіє з поверхневою гармонікою (що не переносить енергію) з малим опором зв'язку. Резонансне поле в ГДВ може бути зображено як сума прямої та зворотної хвиль, а електронний потік взаємодіє з обома хвилями (для перших аксіальних мод) або тільки з однією (для наступних аксіальних мод). Показано, що у випадку гібридної хвилі резонансне коливання можливе тільки для перших аксіальних мод, а режим зворотного зв'язку по зворотній хвилі відбувається для наступних аксіальних мод. Перестроювання зони генерації по напрузі показано на рис. 23, *e*. Для цього режиму вивід випромінювання може бути розташований в верхній стінці ближче до середини (як у ГДВ) чи кінця або застосовано кутові відбивачі. Також (особливо для режиму ЛЗХ) можна користуватись (4), що вказує на збільшення  $D$  порівняно з попереднім режимом і відповідно в експериментальних приладах треба робити можливість переміщення верхньої стінки у великому діапазоні, щоб вивід був ефективним для двох режимів.

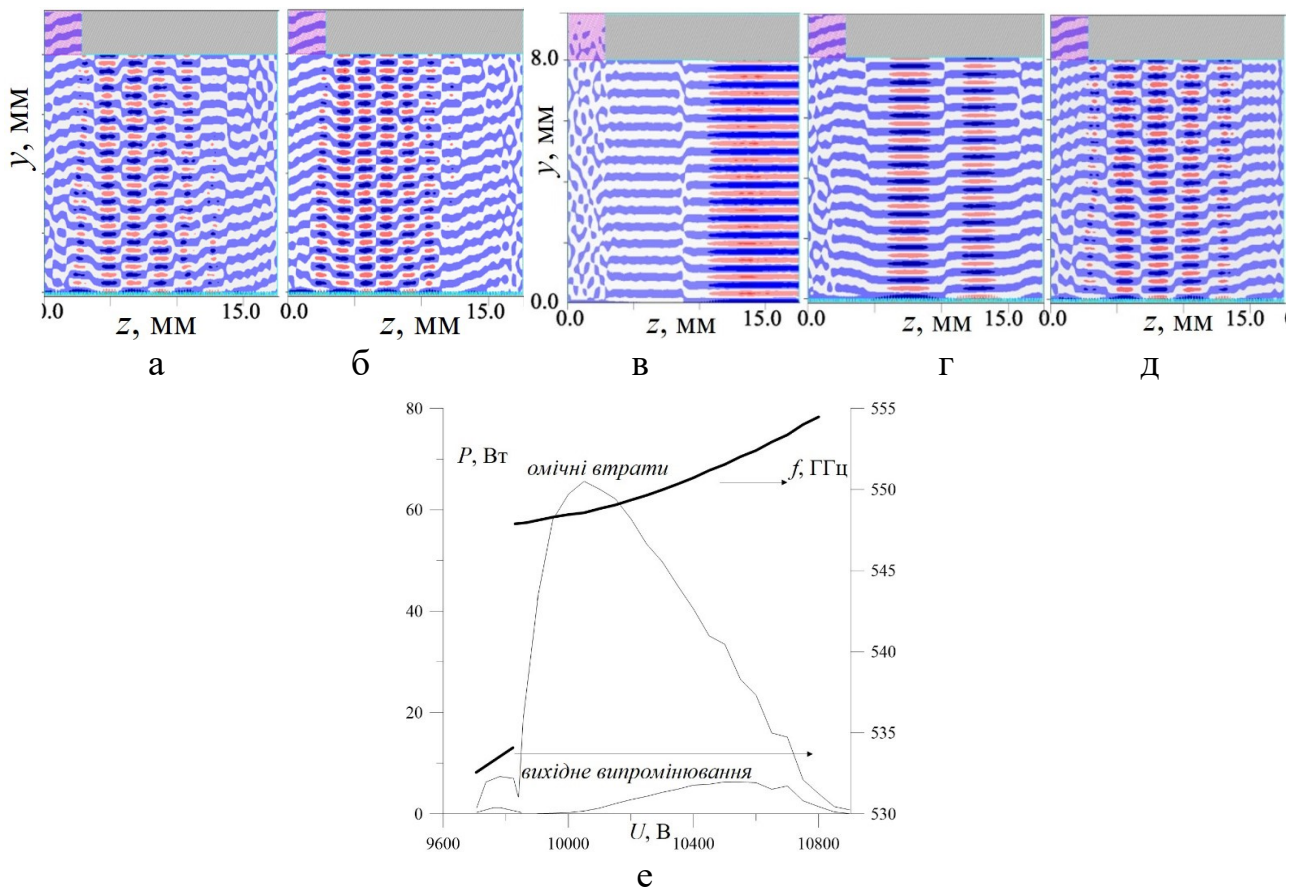


Рисунок 23 – Розподіли ВЧ поля (різні шкали  $y$  та  $z$ ) в стаціонарному режимі при наступних прискорювальних напругах: а)  $U=9,9$  кВ; б)  $U=10,0$  кВ; в)  $U=10,3$  кВ; г)  $U=10,4$  кВ; д)  $U=10,6$  кВ; е) зона генерації при зміні напруги

Режим генерації, коли кут випромінювання є близьким до  $180^\circ$  (режим *C* на рис. 18), показано на рис. 24. В цьому випадку верхня стінка майже не впливає на збудження коливань. В цьому режимі зворотний зв'язок може бути як по

зворотній об'ємній хвилі (рис. 24, а), так і завдяки створенню резонатора за рахунок рефлекторів, нахилених на невеликий кут відносно нормалі гребінки, як показано на рис. 24, б. В цьому режимі також закорочення декількох канавок гребінки майже не впливає на характеристики, бо поширення об'ємної хвилі близьке до режиму хвилі Zennek-Sommerfeld над плоскою поверхнею металу.

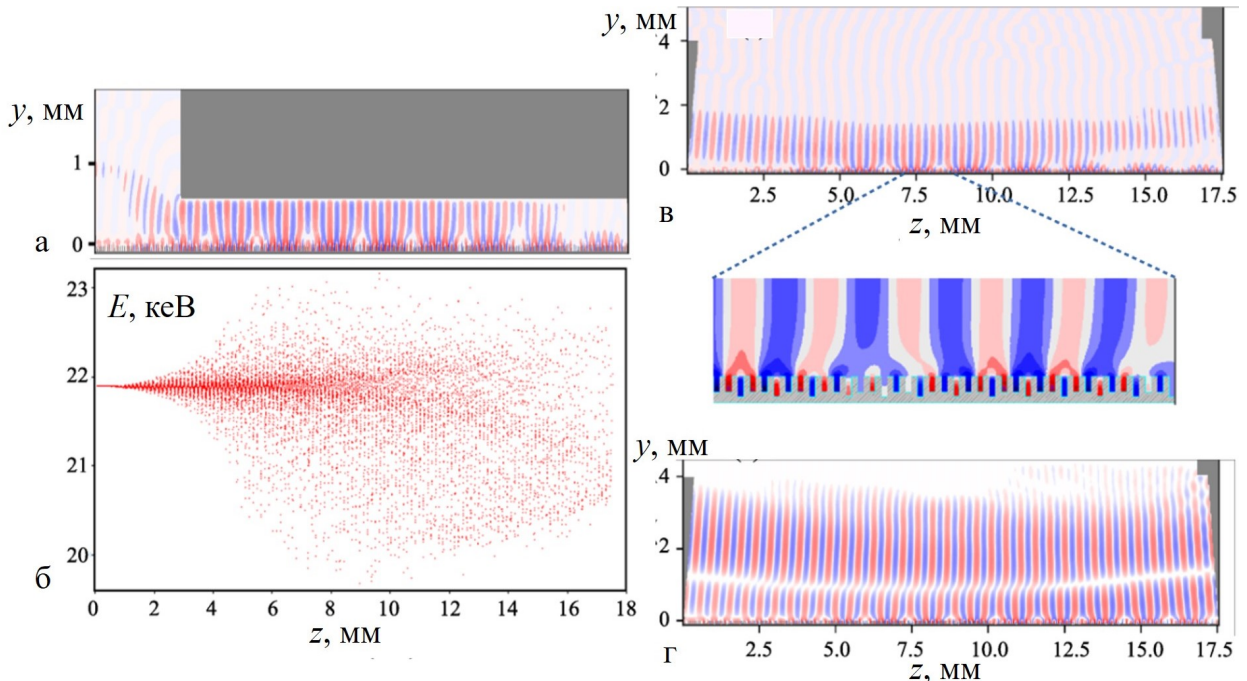


Рисунок 24 – Моделювання режиму генерації С: а) розподіли ВЧ поля в стаціонарному режимі та б) фазовий простір електронів при  $U=21.9$  кВ; розподіли ВЧ поля у відкритому резонаторі, які сформовано рефлекторами на кінцях, нахиленими під кутом  $5^\circ$  до гребінки при : в)  $U=21,9$  кВ; г)  $U=24,9$  кВ

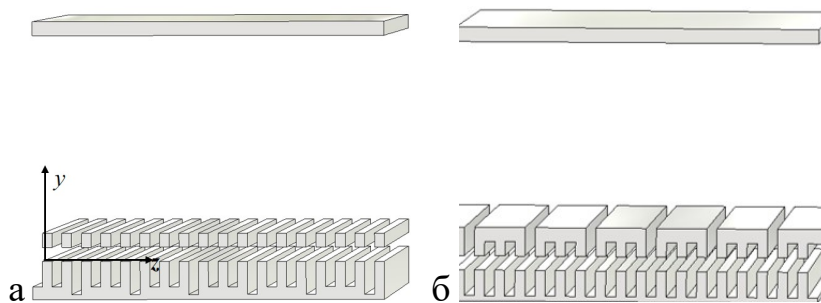


Рисунок 25 – Конфігурації з подвійними неоднорідними ґратками для збудження гібридних хвиль

У шостому підрозділі розглянуто декілька конфігурацій подвійних ґраток (рис. 25) у хвилеводі задля збільшення опору зв'язку електронного потоку по товщині. Зокрема, холодне моделювання показало, що для конфігурації, показаної на рис. 25, б, можливість збільшити не тільки опір зв'язку в 2-3 рази порівняно з одинарною ґраткою, але також розширити діапазон частотного перестроювання, що можна бачити з дисперсійної характеристики та відповідного розподілу ВЧ поля власних мод (рис. 26).

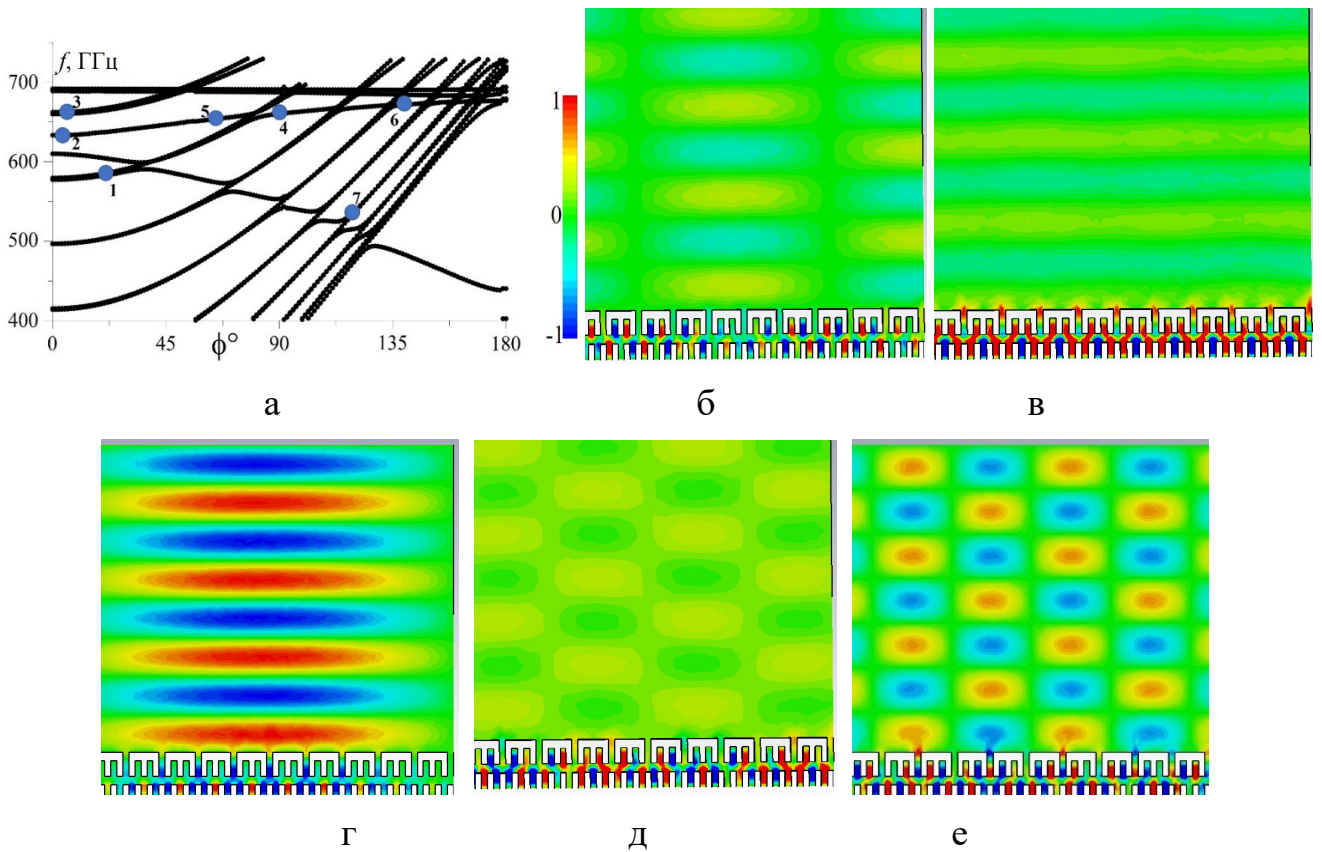


Рисунок 26 – «Холодне» моделювання структури з подвійною гребінкою: а) дисперсія; б-е) розподіли поля  $E_z$  власних мод, що відповідають точкам '1'-'5' на дисперсії: б)  $f=589$  ГГц – '1'; в)  $f=630$  ГГц – '2'; г)  $f=663$  ГГц – '3'; д)  $f=658$  ГГц – '4'; е)  $f=650$  ГГц – '5'

**Розділ 6** дисертації присвячено виявленню особливостей збудження гібридних об'ємно-поверхневих мод електронним потоком у тривимірному випадку та дослідженню правомірності використання двовимірної моделі для проектування приладів. У першому підрозділі наводиться мотивація та поставлені задачі.

У другому підрозділі проведено холодне моделювання для вивчення розподілу ВЧ полів власних гібридних об'ємно-поверхневих мод з однією варіацією по ширині гребінки та порівняно тривимірний розподіл ВЧ полів у режимі чисто поверхневих і чисто об'ємних хвиль, що мають місце в класичних приладах типу ЛЗХ і ГДВ, а також аналізуються відмінності від режиму гібридних об'ємно-поверхневих мод (рис. 27). Так, знайдено, що для основної моди розподіл поверхневих гармонік, зокрема гармоніки, що синхронна з електронним потоком, є майже однорідним по ширині гребінки, як і у випадку режиму чисто поверхневих хвиль, що робить можливим однаково ефективну взаємодію з ВЧ полем по всій ширині електронного потоку.

В третьому підрозділі проведено холодне моделювання для знаходження дисперсії та розподілу ВЧ полів вищих мод з варіаціями по ширині гребінки  $n_x=3,5,7,\dots$ . Із рис. 28 можна бачити, що в певному діапазоні існує міжтипова взаємодія мод (між модами, що відрізняються кількістю варіацій  $n_x$ ).

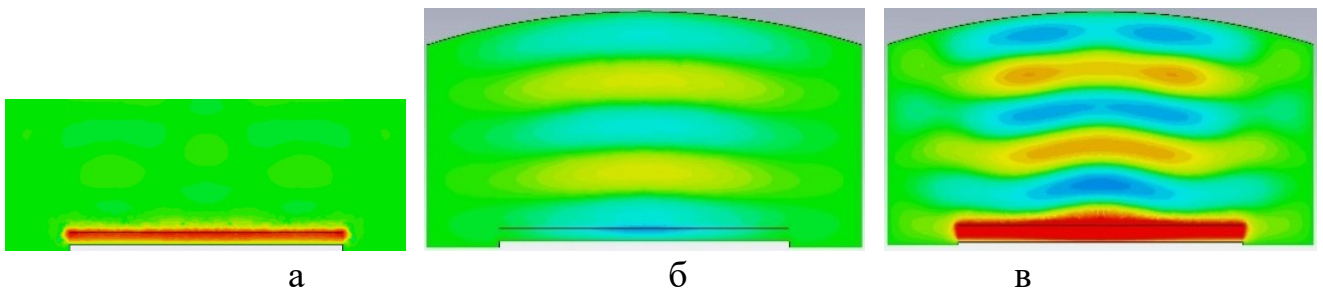


Рисунок 27 – Розподіл ВЧ поля власних мод у поперечному перерізі, що відповідає режимам: а) чисто поверхневої хвилі, б) чисто об'ємної хвилі, в) гібридної об'ємно-поверхневої хвилі

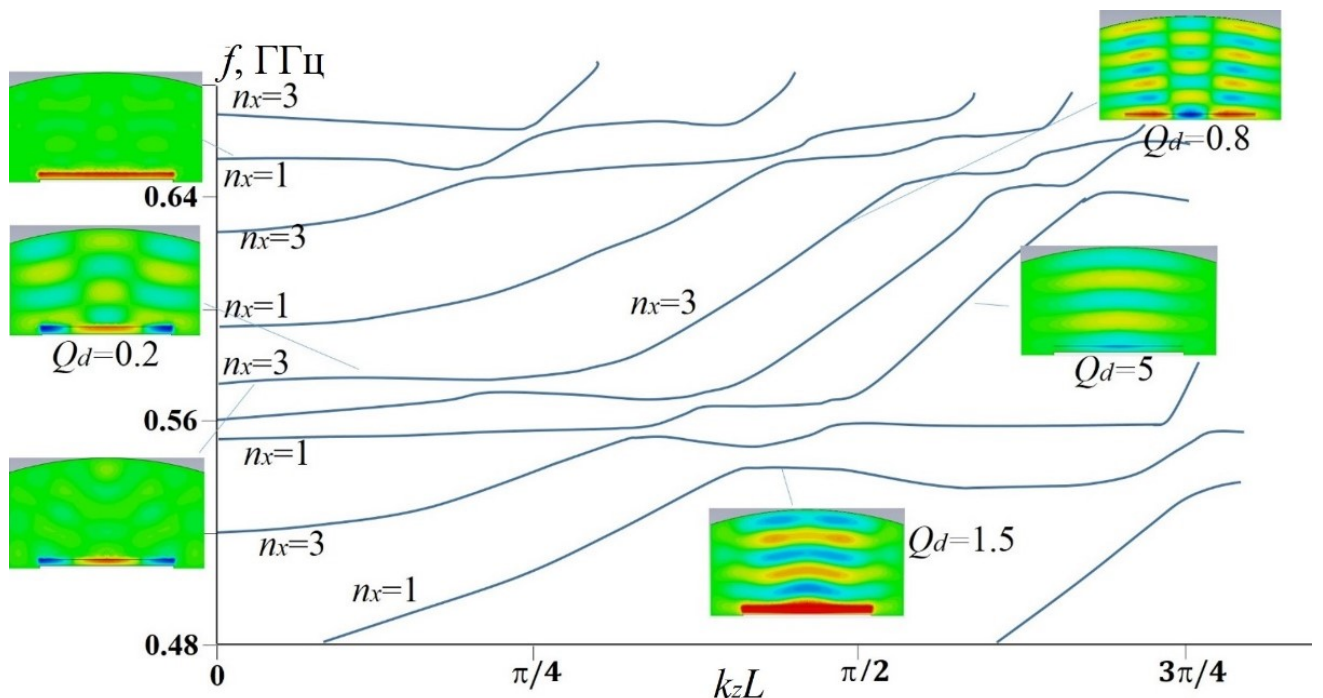


Рисунок 28 – Дисперсія та відповідні поперечні розподіли ВЧ поля для мод з варіаціями уздовж ширини гребінки  $n_x=1$  та  $n_x=3$

Також проаналізовано омичні та дифракційні втрати власних мод для різних  $n_x$ . Показано, що дифракційна добротність падає із збільшенням варіацій поля по ширині, що, як і в приладах типу ГДВ (чисто об'ємної моди), дозволяє значно знизити конкуренцію з боку вищих мод, та отже використовувати гребінку шириною у декілька довжин хвиль з широким електронний потоком для підвищення вихідної потужності.

У четвертому підрозділі проведено чисельне моделювання «гарячого» режиму, тобто самозбудження гібридних об'ємно-поверхневих мод електронним потоком у тривимірному випадку за допомогою пакету MAGIC3D. Показано, що величини вихідної й омичної потужностей дуже близькі до значень, отриманих у двовимірному моделюванні завдяки майже однорідному розподілу ВЧ поля (рис. 29). Аналіз дифракційних втрат в «гарячому» режимі підтвердив результати «холодного» моделювання та припущення про стабільне збудження основної моди по ширині гребінки в широкому діапазоні прискорювальних напруг.



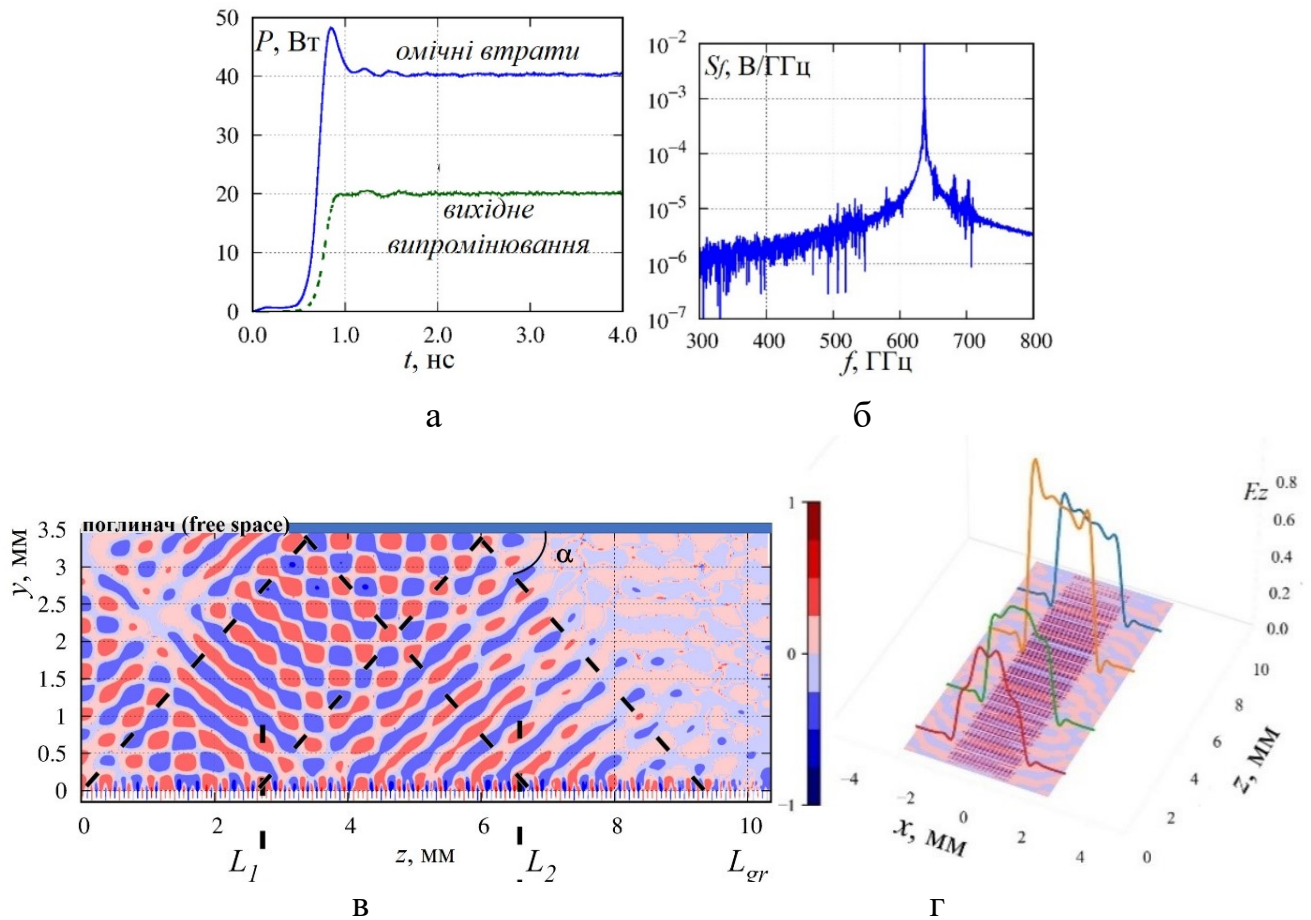


Рисунок 29 – Результати тривимірного моделювання за допомогою MAGIC3D: а) потужності омичних втрат та випромінювання до навантаження; б) частота генерації; в, г) розподіл ВЧ поля в повздовжньому та поперечному перерізах відповідно

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено ряд важливих для теорії та практики проблем, пов'язаних з підвищенням ефективності зворотного зв'язку та вихідної потужності в електронно-вакуумних приладах субТГц і ТГц діапазонів, що працюють на принципах МЦР та черенковського випромінювання. Так, нові фізичні моделі дозволили знайти умови ефективного збудження гібридних об'ємно-поверхневих мод в черенковському генераторі, а також коливань на першій та другій циклотронній гармоніці у просторово-розвинутих електродинамічних системах МЦР.

В результаті проведених досліджень було розроблено нові та покращено характеристики існуючих субТГц гіротронів, що використовуються для досліджень біологічних об'єктів за допомогою ЯМР-ДПЯ спектроскопії з підвищеною чутливістю та для інших практичних застосувань. Також результати досліджень вказують на шляхи покращення характеристик ТГц гіротронів.

Проведені теоретичні дослідження вказують на перспективність створення нової модифікації черенковського генератора субТГц і ТГц діапазонів з

покращеними характеристиками для застосування в системах діагностики плазми, аналізу біологічних і медичних об'єктів, матеріалознавстві та багатьох інших.

До оригінальних наукових результатів, отриманих в дисертаційній роботі, можна віднести наступні.

1. Встановлено, що в гіротронах з аксіальним виводом, в яких є відбиття сигналу або від вихідного вікна, або від відбивача (спеціально розташованого або небажане відбиття від навантаження), розширюється та стає більш ступінчастим діапазон частотного перестроювання за рахунок збудження прямої хвилі з великим аксіальним хвильовим числом; відбувається конкуренція або кооперація мод першої та другої циклотронних гармонік, що можна контролювати коефіцієнтами відбиття; режим роботи стає дуже чутливим до розташування та характеристик відбивача, що треба враховувати, особливо при змінному навантаженні.
2. Виявлено, що придушення генерації на другій циклотронній гармоніці в гіротроні, який було розроблено на 0,8 ТГц, було спричинено генерацією моди першої ЦГ за рахунок позарезонаторної взаємодії з модою з вищим радіальним індексом у вихідному конусі. Встановлено фактори, за яких можна розширити частотне перестроювання при роботі на першій ЦГ, так і за яких завадити конкуренції з боку першої ЦГ для стабільної генерації на другій ЦГ.
3. Встановлено шляхи компенсації зменшення потужності в субТГц гіротроні при зсуві осі електронного потоку відносно осі резонатора, що призводить до конкуренції мод з різними напрямками обертання.
4. Виявлено, що в МВт гіротроні з резонатором, який створено комбінацією регулярної та слабokonусної секцій, існування «гарячої» моди з великою дифракційною добротністю спричиняє збудження більш низьких радіальних мод замість вищих мод при зростанні напруги в імпульсному режимі.
5. Розроблено та реалізовано алгоритми стабілізації та модуляції вихідних параметрів гіротронів з триелектродною гарматою й ізольованим колектором, що було застосовано для підвищення ефекту 460 ГГц ДПЯ для 700 МГц ЯМР спектроскопії.
6. Знайдено режим зворотного зв'язку в черенковському генераторі на гібридних об'ємно-поверхневих модах, що є мало чутливим до омічних втрат за рахунок однократного відбиття зворотної об'ємної хвилі. Для реалізації цього режиму знайдено відношення між геометричними параметрами структури та прискорювальної напруги.
7. Знайдено конфігурацію (положення та ширину виводу випромінювання) в черенковському генераторі на гібридних об'ємно-поверхневих модах, що забезпечує максимальну вихідну потужність. При цьому потужність омічних втрат і вихідної потужності є співрозмірними в діапазоні 0,6 ТГц з урахуванням зниження провідності міді в цьому діапазоні за рахунок шорсткості та ін.
8. Показано, що ефективно збудження гібридної об'ємно-поверхневої моди можливо перегрупованим електронним потоком, що дозволяє збільшити довжину простору взаємодії. При цьому реалізуються дві мети (зазвичай суперечливі в традиційних приладах): зменшення стартового струму та збільшення вихідної потужності.

9. Знайдено тривимірний розподіл ВЧ поля гібридної об'ємно-поверхневої моди. Показано, що розподіл синхронної гармоніки основної моди є майже однорідним по ширині при неоднорідному розподілі об'ємної гармоніки. Це дозволяє ефективну взаємодію з широкими стрічковими електронними потоками для збільшення вихідної потужності. Показано, що в надрозмірному резонаторі селекція основної моди відбувається за рахунок високої дифракційної добротності в порівнянні з вищими модами з варіаціями по ширині гребінки.

## СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1\*. L. M. Buzik, O. F. Pishko, S.A. Churilova, O. I. Sheremet, "Dispersion Characteristics of Multi-Step Open Slow-Wave Systems of Finite Width: Analysis," *Telecommunication and RadioEngineering*, vol. 51, no. 8, pp. 77-84, 1997.
- 2\*. Е. Е. Лысенко, Паньков С. В., Пишко О. Ф., Чумак В. Г., Чурилова С. А. , «Разработка клинотронов непрерывного действия для диапазона 400...500 ГГц,» *Электромагнитные волны и электронные системы*, т. 15, № 11, pp. 63-71, 2010.
- 3\*. V. P. Shestopalov, A. A. Vertiy, G. P. Yermak, B. K. Skrynnik, G. I. Khlopov, A. I. Tsvyk, *Diffraction Radiation Oscillators*, V. P. Shestopalov, Ed., Kyiv: Naukova Dumka, 1991.
- 4\*. Idehara T., Hong K. D., Brand G. F., "A 150-600 GHz Step-tunable Gyrotron," *Journal of Applied Physics*, vol. 74, pp. 5250-5258, 1993.
- 5\*. Sabchevski S., Idehara T., "Resonant Cavities for Frequency Tunable Gyrotrons," *Int J Infrared Milli Waves*, vol. 29, pp. 1-22, 2008.
- 6\*. T.Idehara, S.P. Sabchevski, "Development and applications of high-frequency gyrotrons in FIR FU covering the sub-THz to THz range," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 33, pp. 667-694, 2012.
- 7\*. T. Saito, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, S. Ikeuchi, S. Ogasawara, N. Yamada, R. Ikeda, I. Ogawa, T. Idehara, "Observation of dynamic interaction between fundamental and second-harmonic modes in a high-power sub-terahertz gyrotron operating in regimes of soft and hard self-excitation," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 109, p. 155007, 2012.
- 8\*. I. Bandurkin, A. Fedotov, M. Glyavin, T. Idehara, A. Malkin, V. Manuilov, A. Sergeev, A. Tsvetkov, V. Zaslavsky, I. Zotova, "Development of Third-Harmonic 1.2-THz Gyrotron With Intentionally Increased Velocity Spread of Electrons," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 67, no. 10, pp. 4432-4436, October 2020.
- 9\*. I. V. Bandurkin, Yu. K. Kalynov, A. V. Savirov, "High-harmonic gyrotron with sectioned cavity," *Phys. Plasmas*, vol. 17, p. 073101, 2010.
- 10\*. V.N. Manuilov, M.Yu. Glyavin, A.S. Sedov, V.Yu Zaslavsky, T. Idehara, "Design of a Second Harmonic Double-Beam Continuous Wave Gyrotron with Operating

- Frequency of 0.79 THz," *J Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 36, no. 112, pp. 1164-1175, 2015.
- 11\*. M. M. Melnikova, A. Rozhnev, N. Ryskin, Y. Tatematsu, M. Fukunari, Y. Yamaguchi, T. Saito, "Electromagnetic Modeling of a Complex-Cavity Resonator for the 0.4-THz Second-Harmonic Frequency-Tunable Gyrotron," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 64, no. 12, pp. 5141-5146, December 2017.
- 12\*. T. Idehara, K. Shibutani, H. Nojima, M. Pereyaslavets, K. Yoshida, I. Ogawa, T. Tatsukawa, "Study of electron beam misalignment in a submillimeter wave gyrotron," *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 19, no. 10, pp. 1303-1316, 1998.
- 13\*. T. Idehara, K. Yoshida, N. Nishida, I. Ogawa, M. Pereyaslavets, T. Tatsukawa, «CW operation of a submillimeter wave gyrotron (Gyrotron FU IV) for high stability of the output frequency,» *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, т. 19, pp. 793-799, 1998.
- 14\*. T. Idehara, I. Ogawa, La Agusu, T. Kanemaki, S. Mitsudo, T. Saito, T. Fujiwara, H. Takahashi, "Development of 394.6 GHz CW Gyrotron (Gyrotron FU CW II) for DNP/Proton-NMR at 600 MHz," *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 28, no. 6, p. 433–442, 2007.
- 15\*. T. Idehara, M. Glyavin, A. Kuleshov, S. Sabchevski, V. Manuilov, V. Zaslavsky, I. Zotova, A. Sedov, "A Novel THz-Band Double-Beam Gyrotron for High-Field DNP NMR Spectroscopy," *Review of Scientific Instruments*, vol. 88, no. 9, p. 094708, 2017.
- 16\*. D. S. Tax, O. V. Sinitsyn, W. C. Guss, G. S. Nusinovich, M. A. Shapiro, R. J. Temkin, "Experimental Study of the Start-Up Scenario of a 1.5-MW, 110-GHz Gyrotron," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 41, no. 4, pp. 862-871, 2013.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **E. Khutoryan**, "Mode Interaction for Random Signal Generation in MM-Waveband Vacuum Oscillators", *Applied Radio Electronics*, Vol. 12, No 1, pp. 51-53, 2013. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Prre\\_2013\\_12\\_1\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Prre_2013_12_1_11)
2. M. Sattarov, **E. Khutoryan**, K. Lukin, O. Kwon, G.-S. Park, "Improved Efficiency of Backward-Wave Oscillator With an Inclined Electron Beam", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 60, No 1, pp. 458 – 463, 2013. DOI: [10.1109/TED.2012.2225837](https://doi.org/10.1109/TED.2012.2225837).
3. **E. Khutoryan**, O. Dumbrajs, G. Nusinovich, T. Idehara, "Theoretical Study of the Effect of Electron Beam Misalignment on Operation of the Gyrotron FU IV A", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 42, No 6, pp. 1586 – 1593, 2014. DOI: [10.1109/TPS.2014.2322674](https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2322674).
4. **E. Khutoryan**, G. Nusinovich, O. Sinitsyn, "Competition between modes with different axial structures in gyrotrons", *Physics of Plasmas*, Vol. 21, No 9, 093114, 2014. DOI: [10.1063/1.4896709](https://doi.org/10.1063/1.4896709).

5. **E. Khutoryan**, M. Sattorov, K. Lukin, O.J. Kwon, S.-H. Min, R. Bhattacharya, I.-K. Baek, S. Kim, M. Yi, J. So, G.-S. Park, "Theory of Multimode Resonant Backward-Wave Oscillator With an Inclined Electron Beam", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 62, No 5, pp. 1628-1634, 2015. DOI: [10.1109/TED.2015.2411680](https://doi.org/10.1109/TED.2015.2411680).
6. M. Sattorov, **E. Khutoryan**, K. Lukin, O.J. Kwon, S.-H. Min, R. Bhattacharya, I.-K. Baek, S. Kim, M. Yi, J. So, G.-S. Park, "Automodulation Processes in Clinotrons With Low-Focusing Magnetic Field", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 62, No 5, pp. 1617-1621, 2015. DOI: [10.1109/TED.2015.2409292](https://doi.org/10.1109/TED.2015.2409292).
7. Idehara, T., Tatematsu, Y., Yamaguchi, Y., **Khutoryan E. M.** et al. "The Development of 460 GHz gyrotrons for 700 MHz DNP-NMR spectroscopy", *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 36, No 7, pp. 613-627, 2015. DOI: 10.1007/s10762-015-0150-z.
8. T. Idehara, **E. Khutoryan**, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, A.N. Kuleshov, O. Dumbrajs, Y. Matsuki, T. Fujiwara, "High-Speed Frequency Modulation of a 460-GHz Gyrotron for Enhancement of 700-MHz DNP-NMR Spectroscopy", *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 36, No: 9, pp: 819-829, 2015. DOI: 10.1007/s10762-015-0176-2.
9. **E. Khutoryan**, T. Idehara, A. Kuleshov, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, Y. Matsuki, T. Fujiwara, "Stabilization of Gyrotron Frequency by PID Feedback Control on the Acceleration Voltage", *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 36, No 12, pp. 1157-1163, 2015. DOI: 10.1007/s10762-015-0212-2.
10. O. Dumbrajs, **E. Khutoryan**, T. Idehara, "Hysteresis and Frequency Tunability of Gyrotrons", *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 37, No 6, pp. 551–560, 2016. DOI: 10.1007/s10762-015-0240-y.
11. N. Miyoshi, T. Idehara, **E. Khutoryan**, Y. Fukunaga, A. Bibin, S. Ito, S. Sabchevski "Combined Hyperthermia and Photodynamic Therapy Using a Sub-THz Gyrotron as a Radiation Source", *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 37, No 8, pp. 805–814, 2016. DOI: 10.1007/s10762-016-0271-z.
12. T. Idehara, **E. Khutoryan**, I. Ogawa, Y. Matsuki, T. Fujiwara, "Modulation and Stabilization of the Output Power and Frequency of FU Series Gyrotrons", *International Journal on Terahertz Science and Technology*, Vol. 9, No 4, pp. 117-130, 2016. DOI: [10.11906/TST.117-130.2016.12.12](https://doi.org/10.11906/TST.117-130.2016.12.12).
13. **E. Khutoryan**, T. Idehara, M. Melnikova, N. Ryskin, O. Dumbrajs "Influence of Reflections on Frequency Tunability and Mode Competition in the Second-Harmonic THz Gyrotron", *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 38, No 7, pp. 824–837, 2017. DOI: 10.1007/s10762-017-0378-x.
14. **E. Khutoryan**, T. Idehara, A. N. Kuleshov, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, Y. Matsuki, T. Fujiwara, "Simultaneous Stabilization of Gyrotron Frequency and

- Power by PID Double Feedback Control on the Acceleration and Anode Voltages”, *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 38, No 7, pp. 813–823, 2017. DOI: [10.1007/s10762-017-0374-1](https://doi.org/10.1007/s10762-017-0374-1).
15. K. Kato, H. Qiu, **E. Khutoryan**, Y. Tatematsu, M. Tani, T. Idehara, Y. Yamaguchi, M. Fukunari, Y. Maeda, K. Takayama, Y. Minami, M. Empizo, T. Kurihara, K. Yamanoi, T. Shimizu, K. Takano, N. Sarukura, T. Fukuda, M. Yoshimura, M. Nakajima, “Strong yellow emission of high-conductivity bulk ZnO single crystals irradiated with high-power gyrotron beam”, *Applied Physics Letters*, Vol. 111, No 3, 2017. DOI: [10.1063/1.4994316](https://doi.org/10.1063/1.4994316).
  16. Y. Toda, S. Ishiyama, **E. Khutoryan**, T. Idehara, S. Matsuishi, P. Sushko, H. Hosono, “Rattling of Oxygen Ions in a Sub-Nanometer-Sized Cage Converts Terahertz Radiation to Visible Light”, *ACS Nano*, Vol. 11, No 12, pp. 12358–12364, 2017. DOI: [10.1021/acsnano.7b06277](https://doi.org/10.1021/acsnano.7b06277).
  17. S. Mitsudo, M. Glyavin, **E. Khutoryan**, I. Bandurkin, T. Saito, Y. Ishikawa, V. Manuilov, I. Zotova, A. Fedotov, A. Kuleshov, "An Experimental Investigation of a 0.8 THz Double-Beam Gyrotron," *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*", Vol. 40, No 11, pp. 1114-1128, 2019. DOI: [10.1007/s10762-019-00629-6](https://doi.org/10.1007/s10762-019-00629-6).
  18. **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, S. Kishko, S. Ponomarenko, M. Glyavin, I. Bandurkin, V. Manuilov, A. Fedotov, I. Zotova, S. Sabchevski, Y. Ishikawa, M. Fukunari, T. Saito, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, T. Idehara, “Increase of Gyrotron Output Power at High-Order Axial Mode Through an After-Cavity Excitation of the Next Transverse Mode”, *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*", Vol. 42, No 6, pp. 684–700, 2021. DOI: [10.1007/s10762-021-00798-3](https://doi.org/10.1007/s10762-021-00798-3).
  19. **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, S. Ponomarenko, K. Lukin, Y. Tatematsu, M. Tani, “Efficient Excitation of Hybrid Modes in a THz Clinotron”, *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 42, No 6, pp. 671–683, 2021. DOI: [10.1007/s10762-021-00800-y](https://doi.org/10.1007/s10762-021-00800-y).
  20. **E. Khutoryan**, A. N. Kuleshov, S. S. Ponomarenko, K. A. Lukin, Y. Tatematsu, M. Tani, "Hybrid Bulk-Surface Modes Excited by a Sheet Electron Beam in THz Cherenkov Oscillator," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 69, No 6, pp. 3407-3412, 2022, DOI: [10.1109/TED.2022.3168526](https://doi.org/10.1109/TED.2022.3168526).
  21. S. Ponomarenko, S. Kishko, A. Likhachev, **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, “Electromagnetic sources for THz imaging and DNP NMR spectroscopy,” In: *Electromagnetic Waves and Antennas for Biomedical Applications*, 2021. DOI: [10.1049/PBHE033E\\_ch3](https://doi.org/10.1049/PBHE033E_ch3)
  22. K. Lukin, **E. Khutoryan**, “Mode interaction in resonant Clinotron”, *IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC-2011)*, p.123-124, 2011. DOI: [10.1109/IVEC.2011.5746906](https://doi.org/10.1109/IVEC.2011.5746906)
  23. M. Sattarov, **E. Khutoryan**, K. Lukin, Gun-Sik Park, A. Bera, R. Barik, O. Kwon, Sun-Hong Min, A. Sharma, A. Tanwar, “Experimental study on 0.1 THz

- clinetron”, IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC-2012), p.453-454, 2012. DOI: [10.1109/IVEC.2012.6262236](https://doi.org/10.1109/IVEC.2012.6262236)
24. M. Sattorov, **E. Khutoryan**, K. Lukin, G-S Park, O. Kwon, “Automodulation processes in THz resonant backward wave oscillator with low focusing magnetic field”, 2012 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves", 1-2, 2012. DOI: [10.1109/IRMMW-THz.2012.6380269](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2012.6380269)
  25. **E. Khutoryan**, A. Tsvyk, V. ZheltoV, “About reflection diffraction radiation oscillator operation at second space harmonic," 2013 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, p. 403-405, 2013. DOI: [10.1109/MSMW.2013.6622067](https://doi.org/10.1109/MSMW.2013.6622067).
  26. T. Idehara, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, K. Ueda, Y. Matsuki, T. Fujiwara, “Sub-THz gyrotrons with special functions of frequency control for applications to DNP-NMR spectroscopy," 2014 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), 1-2, 2014. DOI: [10.1109/IRMMW-THz.2014.6956167](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2014.6956167)
  27. **E. Khutoryan**, T. Idehara, A. Kuleshov, K. Ueda, “Stabilization of Gyrotron Output Power by Use of PID Feedback Control of Anode Voltage,” Meeting Abstracts of the Physical Society of Japan 70.1, p. 552, 2015. DOI: [10.11316/jpsgaiyo.70.1.0\\_552](https://doi.org/10.11316/jpsgaiyo.70.1.0_552)
  28. T. Idehara, **E. Khutoryan**, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, A. Kuleshov, O. Dumbrajs, Y. Matsuki, T. Fujiwara, “High speed frequency modulation of a 460 GHz gyrotron for application to the 700 MHz DNP enhanced NMR spectroscopy”, 2015 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), p. 1-2. DOI: [10.1109/IRMMW-THz.2015.7327859](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2015.7327859)
  29. **E. Khutoryan**, T. Idehara, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, A. Kuleshov; Y. Matsuki, T. Fujiwara, “Frequency Modulation of sub-THz gyrotron for 700 MHz DNP-NMR spectroscopy”, Meeting Abstracts of the Physical Society of Japan 70.2, 650, 2015. DOI: [10.11316/jpsgaiyo.70.2.0\\_650](https://doi.org/10.11316/jpsgaiyo.70.2.0_650).
  30. T. Idehara, A. Kuleshov, **E. Khutoryan**, Y. Tatematsu, Y. Matsuki, T. Fujiwara, S. Asai, T. Suehara, T. Yamazaki, A. Miyazaki, “High power THz technologies opened by high frequency gyrations covering Sub-THz to THz region," 2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), p. 1-3, 2016. DOI: [10.1109/MSMW.2016.7538046](https://doi.org/10.1109/MSMW.2016.7538046)
  31. **E. Khutoryan**, T. Idehara, M. Melnikova, A. Rozhnev, N. Ryskin, "Influence of reflections on frequency stability, tunability and mode competition in the second-harmonic THz gyrotron", 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz),1-2, 2016. DOI: [10.1109/IRMMW-THz.2016.7758527](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2016.7758527)
  32. **E. Khutoryan**, T. Idehara, A. Kuleshov, Y. Tatematsu, Y. Yamaguchi, Y.

- Matsuki, T. Fujiwara, "Gyrotron output frequency and power stabilization by PID feedback control on the acceleration and anode voltages," 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)", p. 1-2, 2016. DOI: [10.1109/IRMMW-THz.2016.7758502](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2016.7758502)
33. **E. Khutoryan**, T. Idehara, N. Ryskin, M. Melnikova, O. Dumbrajs, "Using of reflections for expansion of frequency tuning in a THz-band gyrotron", 2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC), p.1-3, 2017. DOI: [10.1109/IVEC.2017.8289725](https://doi.org/10.1109/IVEC.2017.8289725)
  34. **E. Khutoryan**, S. Ponomarenko, S. Kishko, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, M. Tani, A. Kuleshov, "THz Cherenkov Oscillator with Surface-Radiating Modes," 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)", p. 1-2, 2019. DOI: [10.1109/IRMMW-THz.2019.8874184](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2019.8874184)
  35. I. Bandurkin, A. Fokin, Glyavin M., **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, S. Mitsudo, S. Sabchevski, Y. Tatematsu, T. Saito, Y. Ishikawa, "An Experimental Investigation of a 0.8 THz Gyrotron with an Improved Mode Selection," 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)", p.1-2, 2019. DOI: [10.1109/IRMMW-THz.2019.8874170](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2019.8874170)
  36. M. Nakajima, K. Kato, H. Qiu, T. Shimizu, N. Sarukura, M. Yoshimura, T. Fukuda, **E. Khutoryan**, Y. Tatematsu, M. Tani, "Observation of strong yellow emission for high-conductivity ZnO excited by sub-terahertz gyrotron beam," 2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), p. 1-2, 2019. DOI: [10.1109/IRMMW-THz.2019.8873849](https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2019.8873849)
  37. A. Likhachev, S. Ponomarenko, S. Kishko, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, M. Tani, Masahiko, **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, K. Lukin, "THz Clinotron Operating in New Regime of Hybrid Surface-Volume Mode with Wide Frequency Tuning Range," 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), p. 1-4, 2020. DOI: [10.1109/UkrMW49653.2020.9252641](https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252641)
  38. **E. Khutoryan**, S. Ponomarenko, S. Kishko, K. Lukin, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, M. Tani, A. Kuleshov, "Efficient Regime of Hybrid Surface-Radiating Waves in a THz Clinotron," 2020 IEEE 21st International Conference on Vacuum Electronics (IVEC), p. 155-156, 2020. DOI: [10.1109/IVEC45766.2020.9520601](https://doi.org/10.1109/IVEC45766.2020.9520601)
  39. **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, A. Fedotov, S. Sabchevski, I. Bandurkin, V. Manuilov, I. Zotova, A. Fokin, S. Kishko, S. Ponomarenko," Influence of the Aftercavity Interaction on the Output Power of a Gyrotron Operating at a High-Order Axial Mode," 2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC), p. 1-2, 2021. DOI: [10.1109/IVEC51707.2021.9722446](https://doi.org/10.1109/IVEC51707.2021.9722446)
  40. S. Ponomarenko, A. Likhachev, V. Stoyanova, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, M. Tani, **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, K. Lukin, "Simulation and Design of 300 GHz CW Clinotron Oscillator on Hybrid Surface-Volume Modes," 2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC), p. 1-2, 2021.



DOI: [10.1109/IVEC51707.2021.9722445](https://doi.org/10.1109/IVEC51707.2021.9722445)

41. **E. M. Khutoryan**, A. N. Kuleshov, S. S. Ponomarenko, K. A. Lukin, Y. Tatematsu, M. Tani, "Hybrid Bulk-Surface Modes Excited in the THz Cherenkov Oscillator with the Double Grating," 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), p.238-241,2022. DOI: [10.1109/UkrMW58013.2022.10037038](https://doi.org/10.1109/UkrMW58013.2022.10037038)
42. **E. Khutoryan**, A Kuleshov, S Ponomarenko, K Lukin, Y Tatematsu, M Tani, "The 3D Study of the Hybrid Bulk-Surface Eigen Modes in the THz Cherenkov Oscillator," 2022 23 International Vacuum Electronics Conference (IVEC), pp. 502-503. DOI: [10.1109/IVEC53421.2022.10292384](https://doi.org/10.1109/IVEC53421.2022.10292384).
43. **E. Khutoryan**, A. Kuleshov, S. Ponomarenko, K. Lukin, Y. Tatematsu, M. Tani, "THz Cherenkov Oscillator Efficiency Increase by Use of Long Structures," 2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Chengdu, China, 2023, pp. 1-2. DOI: [10.1109/IVEC56627.2023.10157891](https://doi.org/10.1109/IVEC56627.2023.10157891)

## АНОТАЦІЯ

**Хуторян Е. М. Збудження електромагнітних коливань субтерагерцового та терагерцового діапазонів в електронно-вакуумних приладах з просторово розвинутим зворотним зв'язком.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків, 2023.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню важливої науково-прикладної проблеми підвищення ефективності взаємодії електронних потоків з електромагнітними полями субтерагерцового (субТГц) і терагерцового (ТГц) діапазонів в електронно-вакуумних приладах (ЕВП) черенковського типу та в мазерах на циклотронному резонансі (МЦР). З метою подолання «ТГц провалля» детально вивчені закономірності та явища, притаманні фізичним процесам в цих приладах, що дозволило запропонувати створення зворотного зв'язку, який може суттєво зменшити вплив негативних факторів, що впливають на ефективність ТГц ЕВП. Так, наприклад, досліджено режим на гібридних об'ємно-поверхневих модах, при якому значно зменшується чутливість до омичних втрат в уповільнювальній системі черенковського генератора. Також розглянуто резонансний зворотний зв'язок, породжений додатковими відбивачами, та позарезонаторною взаємодією для ефективної генерації та розширення діапазону частотного перестроювання в гіротроні. Під час дослідження процесів взаємодії стрічкових і полігвинтових електронних потоків з електромагнітними хвилями, що збуджувались у надрозмірних електродинамічних системах електронно-вакуумних генераторів субТГц і ТГц діапазонів, було вперше виявлено низку фізичних ефектів, що суттєво впливають на вихідні характеристики приладів.

**Ключові слова:** гіротрон, МЦР, відбиття хвиль з затримкою, ЛЗХ, клинотрон, черенковський генератор, ТГц випромінювання, електронно-хвильова

взаємодія, гібридні об'ємно-поверхневі хвилі, позарезонаторна взаємодія, стабілізація та модуляція частоти випромінювання.

## ABSTRACT

**Khutoryan E. M. Excitation of electromagnetic oscillations in sub-THz and THz ranges in vacuum electron devices with spatially developed feedback. – As a manuscript.**

**Thesis for scientific degree of doctor of science in physics and mathematics on specialty 01.04.04 – physical electronics. – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine, Kharkiv, 2023.**

The dissertation is devoted to the solution of an important scientific and applied problem of an increase the efficiency of the interaction of electron beams with electromagnetic fields of the sub-THz and THz ranges in vacuum electron devices (VEDs) based on the Cherenkov radiation and in cyclotron resonance masers (CRM). To overcome the “THz gap” issue, the regularities and phenomena inherent in these physical processes were studied in detail, which made it possible to propose the creation of a feedback loop that can significantly reduce the influence of negative factors affecting the efficiency of THz VEDs. So, for example, the regime on hybrid bulk-surface modes has investigated, in which the sensitivity to ohmic losses in the slow wave system of the Cherenkov oscillator is significantly reduced. Resonant feedback formed by additional reflectors and after-cavity interaction for the efficient oscillations and the extension of the frequency tuning range in gyrotron have been also considered. During the study of the processes of interaction of sheet and multi-helical electron beams with electromagnetic waves excited in oversized electrodynamic systems of subTHz and THz VEDs, a number of physical effects that significantly affect the output characteristics of the devices were discovered for the first time.

Keywords: gyrotron, CRM, delayed reflection of waves, BWO, clinotron, Cherenkov oscillator, THz radiation, electron-wave interaction, hybrid bulk-surface waves, after-cavity interaction, frequency stabilization and modulation.