

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

**КУЛЕШОВ ОЛЕКСІЙ МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 621.385.6

**НОВІ РЕЖИМИ АВТОКОЛИВАНЬ У НИЗЬКОВОЛЬТНИХ  
ЕЛЕКТРОННО-ВАКУУМНИХ ПРИЛАДАХ МІЛІМЕТРОВОГО ТА  
СУБМІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНІВ ІЗ ПЕРЕСТРОЮВАННЯМ  
ЧАСТОТИ**

01.04.04 – фізична електроніка

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

Харків – 2021

Дисертація на правах рукопису

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

**Науковий консультант** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Лукін Костянтин Олександрович**,  
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова  
НАН України (м. Харків),  
завідувач відділу нелінійної динаміки електронних  
систем

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Чурюмов Геннадій Іванович**,  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки МОН України (м. Харків), професор  
кафедри фізичних основ електронної техніки

доктор фізико-математичних наук, професор, член-  
кореспондент НАН України

**Гірка Ігор Олександрович**,  
Харківський національний університет  
імені В.Н. Каразіна МОН України (м. Харків),  
директор Навчально-наукового інституту «Фізико-  
технічний факультет»

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** 13 травня 2021 р. о 14<sup>00</sup> 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 8 квітня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

І.В. Іванченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Джерела електромагнітного випромінювання міліметрового (мм) та субміліметрового (субмм) діапазонів знаходять широке застосування в багатьох практичних задачах, таких як субміліметрова спектроскопія діелектричних та біологічних матеріалів, системи ТГц бачення, діагностика плазми, системи зв'язку та радіолокації і багато іншого. Зокрема, з метою підвищення чутливості ядерного магнітно-резонансного (ЯМР) спектрального аналізу біологічних та медичних матеріалів за допомогою динамічної поляризації ядер (ДПЯ), потрібні джерела випромінювання в діапазоні частот 140-800 ГГц, що володіють достатніми рівнями вихідної потужності в широких діапазонах частот [1\*, 2\*].

У субмм діапазоні частот найбільші рівні вихідної потужності мають електронно-вакуумні прилади класу мазерів на циклотронному резонансі (МЦР), у той час як у короткохвильовій частині мм діапазону достатні рівні потужності для багатьох застосувань мають компактні лампи зворотної хвилі (ЛЗХ) та їх модифікації, клістриони з розподіленою взаємодією, генератори дифракційного випромінювання (ГДВ) та оротрони. Генератори класу ЛЗХ О-типу, принцип роботи яких засновано на індукованому випромінюванні Вавілова-Черенкова, мають найбільші діапазони електронного перестроювання частоти та достатньо високу стабільність, що зумовлює актуальність робіт зі збільшення їх вихідної потужності у субмм діапазоні.

Падіння потужності випромінювання черенковських приладів у субмм діапазоні відбувається внаслідок зменшення об'єму ефективного шару високочастотного (ВЧ) поля поверхневої хвилі, а також зростанням омичних втрат хвилі з ростом частоти завдяки зменшенню глибини скін-шару в металі. Підвищення вихідної потужності черенковських приладів шляхом застосування надщільних стрічкових електронних потоків ускладнено як труднощами формування та транспортування таких пучків в сильних магнітних полях, так і локальним перегрівом елементів електродинамічних систем, що сповільнюють рух хвиль. У черенковських приладах із плоскими гребінками збільшення потужності генерації спостерігається завдяки нахилу стрічкового електронного пучка до поверхні гребінки (клинотронний ефект) [3\*]. Задля зменшення омичних ВЧ втрат в черенковських приладах перспективним є збудження електронним пучком коливань об'ємних резонаторів із розподілом ВЧ поля як поблизу поверхні гребінки в області взаємодії, так і в об'ємі резонатора. Також актуальними є дослідження підвищення ефективності електронно-хвильової взаємодії за рахунок формування та транспортування щільних стрічкових електронних потоків, параметри яких оптимальні з точки зору розподілу ВЧ поля в резонаторах.

Слід зазначити, що в мм та субмм діапазонах довжин хвиль прилади класу МЦР мають значення вихідної потужності, які є достатніми для широкого спектру практичних задач - від мегаватних рівнів для систем керованого термоядерного синтезу до декількох ват у ЯМР-ДПЯ спектроскопії. У субмм діапазоні зниження прискорювальної напруги гіротронів, що працюють на вищих гармоніках циклотронної частоти з рівнями вихідної потужності від одиниць до сотень ват, є актуальним завданням, що дозволить суттєво зменшити габарити приладів та їх

джерел живлення, а також спростить роботу з ними. Однак в низьковольтних режимах роботи гіротронів знижується ефективність механізму азимутально-фазового групування електронів гвинтових електронних пучків (ГЕП), що відбувається за рахунок залежності циклотронної частоти релятивістських електронів від їх кінетичної енергії, та у разі низьковольтного пучка вимагає суттєвого збільшення довжини резонатора. Оскільки зі збільшенням довжини резонатора зростає його дифракційна добротність, суттєве збільшення довжини простору взаємодії призведе до зниження потужності випромінювання та ефективності гіротрону. Як показують теоретичні та експериментальні дослідження, актуальною задачею є розробка гіротронів на фундаментальну та другу циклотронні гармоніки з достатньо високим коефіцієнтом корисної дії (ККД) на діапазон прискорювальної напруги 5-10кВ [4\*,5\*].

У гіротронах стабільність параметрів випромінювання визначається високою добротністю резонаторів та може бути підвищено завдяки використанню додаткових зовнішніх систем з фазовим автоматичним підстроюванням частоти (ФАПЧ). Діапазон перестроювання частоти випромінювання гіротронів з відкритими циліндричними резонаторами є обмеженим наявністю спектра високодобротних робочих мод. В той же час, велика кількість застосувань потребує джерел електромагнітного випромінювання з можливістю перестроювання частоти випромінювання в широкому діапазоні. Плавне механічне перестроювання частоти гіротронів досягається завдяки зміні геометричних розмірів резонаторів [6\*]. Одною з перспективних конфігурацій відкритого резонатора гіротрону з перестроюванням частоти в широкому діапазоні є резонатор з двома еліптичними або плоскими дзеркалами [7\*]. У дводзеркальних резонаторах гіротронів використання стрічкових ГЕП замість трубчастих може суттєво підвищити ефективність електронно-хвильової взаємодії. Дослідження процесів формування стрічкового електронного пучка зі значною обертальною енергією електронів (пітч-фактором) та його взаємодії з власними модами дводзеркального резонатора гіротрону є актуальною задачею.

Застосування електронно-вакуумних приладів у задачах спектроскопії пред'являє високі вимоги до стабільності параметрів випромінювання, які залежать від керованих (напруги живлення, профіль та величина магнітного поля тощо) та некерованих (тиск залишкових газів в резонаторі приладу, зміна струму пучка під впливом іонізації молекул газу та вторинної електронної емісії, зміна струму емісії в результаті розігріву поверхні емітера електромагнітним випромінюванням, теплові розширення елементів електродинамічних конструкцій під час осідання електронів пучка, а також за рахунок омичних втрат хвиль) параметрів. Незначні амплітуди пульсації напруги живлення разом із зміною некерованих параметрів можуть призводити до суттєвих коливань вихідної потужності електронно-вакуумних приладів та навіть до зриву генерації, що зумовлює актуальність задачі з розроблення універсальних систем стабілізації та контролю параметрів випромінювання.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відділі вакуумної 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-дослідницьких робіт ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України: «Електродинаміка відкритих резонансних систем та періодичних структур з композитних матеріалів; розробка когерентних джерел та 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); «Розробка нових методів і засобів отримання інформації про фізичні характеристики природних середовищ, їх структурних неоднорідностей, поверхонь розподілу та окремих об'єктів за даними дистанційного зондування і радіолокації» (шифр «СЕНСОРИКА 2», номер держреєстрації 0118U003035). Також дослідження здійснювалися в рамках наступних госпдоговірних робіт: «Потужний НВЧ модуль на основі вакуумного генератора електромагнітних коливань типу Кліноtron «КН-0,88 (340ГГц)» (шифр «ВЕТКА», за замовленням компанії "Тьян Мін" м. Уху, КНР, № WHTM2016UK0406); «Дослідження і спільна розробка конструкції та технології виготовлення вакуумного генератора електромагнітних коливань типу Кліноtron «КН-1,15 (260±2 ГГц)» (шифр «РОСТОК», за замовленням компанії "Тьян Мін" м. Уху, КНР, № 2012DOCX/S901012UR); за замовленням Державної агенції з питань науки, інновації та інформатизації України «Розробка та виготовлення клиноtronів – генераторів ТГц діапазону» (шифр «ГЕНЕРАТОР», номер держреєстрації 0113U002975); в рамках проєкту РФФД «Розробка НВЧ генераторів на швидких та повільних хвилях (гіротронів та клиноtronів) зі стрічковими електронними пучками» (номер проєкта 13-08-90910); за замовленням компанії Terasense Group, Inc. м. Сан-Хосе, США, № EX.IRE.11/2015 «Розробка експериментального зразка вакуумного генератора електромагнітних коливань типу Кліноtron “КН-1,15 (260±2 ГГц)” разом з блоком живлення БУН-1» (шифр «ГЕНЕРАТОР 1»); за замовленням компанії TeraVED Group, Inc. м. Таллінн, Естонія, № 101/2017 «Розробка та поставка науково-технічної продукції» (шифр «ГЕНЕРАТОР 2»).

**Мета і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи – дослідження нових режимів збудження автоколивань в компактних електронно-вакуумних приладах мм та субмм діапазонів з метою підвищення ефективності взаємодії низьковольтних електронних потоків із власними електромагнітними хвилями електродинамічних систем приладів.

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

- знаходження профілю магнітного поля, що фокусує, та геометрії електронно-оптичної системи (ЕОС) методом траєкторного аналізу руху електронних потоків, і на основі отриманих результатів - створення компактних магнітних фокусуєчих систем (МФС) та електронних гармат;
- дослідження ефективності електронно-хвильової взаємодії у клинотронах мм та субмм діапазонів із урахуванням впливу омичних втрат, що викликані шорсткістю поверхонь та осіданням електронів пучка на електродинамічну систему;
- проведення чисельного моделювання електронно-хвильової взаємодії з урахуванням відбиття та трансформації хвиль у надрозмірних резонаторах клинотронів мм та субмм діапазонів;
- проведення чисельного моделювання та експериментального дослідження збудження електронними потоками гібридних поверхнево-об'ємних хвиль в резонаторах клинотронів з багатоступеневими гребінками;
- дослідження нестабільності параметрів випромінювання електронно-вакуумних приладів та розроблення системи стабілізації за допомогою пропорційного-інтегрального-диференційного (ПІД) контролю напруг, що живлять ЕОС, у зовнішніх контурах зворотного зв'язку;
- дослідження механізму групування електронів низьковольтного ГЕП у слабонеоднорідному магнітному полі, а також збудження низьковольтним ГЕП коливань резонаторів гіротрону;
- формування планарною магнетронно-інжекторною гарматою (МІГ) стрічкових ГЕП з великою часткою обертальної енергії, зменшеним значенням розкидів швидкостей та енергій для ефективної генерації в дводзеркальному гіротроні.

*Об'єкт дослідження* – процеси формування та транспортування низьковольтних інтенсивних електронних пучків різних конфігурацій, а також процеси їх взаємодії з електромагнітними хвилями в електронно-вакуумних приладах мм та субмм діапазонів.

*Предмет дослідження* – низьковольтні інтенсивні електронні пучки різних конфігурацій, що формуються в ЕОС та транспортуються в електродинамічних системах електронно-вакуумних приладів, а також електромагнітне поле, що збуджується в резонаторах приладів електронними пучками.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених у дисертації задач використовувалися наступні методи – розв'язання рівнянь Пуассона та руху електрона у слабонеоднорідному магнітному полі проводилося чисельно за допомогою методу Рунге – Кутта. Розрахунок дисперсійних характеристик систем, що сповільнюють рух хвиль, типу гребінка та знаходження електромагнітного поля, що збуджено електронним потоком, проводилися методом перерозкладень. Моделі Хаммерштада-Беккадаля та Відемана-Франца були використані у дослідженнях залежності ВЧ омичних втрат від шорсткості та температури поверхонь систем. Шорсткість поверхонь систем визначалася за допомогою методів оптичної мікроскопії. Електронно-хвильова взаємодія досліджувалася у результаті спільного чисельного вирішення рівняння збудження

хвиль та рівнянь руху електронного потоку з застосуванням методу кінцевих різниць та методу крупних частинок. Експериментальне дослідження розкиду швидкостей електронів пучка проводилося за допомогою методу потенціалу, що гальмує. Експериментальне дослідження профілю електронних потоків проводилося методом фотографування світіння екрану, що бомбардується електронами. Експериментальне дослідження генерації коливачів проводилося за допомогою класичних методів вимірювання частоти та потужності в мм та субмм діапазонах.

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

1. Вперше продемонстровано підвищення ефективності електронно-хвильової взаємодії у клинотронах субмм діапазону з профільованими за швидкістю електронними потоками:
  - а. показано, що розподіл поздовжніх швидкостей електронів пучка, що виникає в несиметричній електронно-оптичній системі, істотно впливає на ефективність електронно-хвильової взаємодії в клинотронах субмм діапазону: завдяки залежності оптимального розсинхронізму від амплітуди ВЧ поля, вихідна потужність клинотронів зростає у разі спадаючого розподілу швидкостей електронів пучка у порівнянні з одношвидкісним потоком та різко падає у протилежному разі;
  - б. знайдено умови виникнення багаточастотного режиму генерації в клинотроні з несиметричною електронно-оптичною системою.
2. Вперше знайдено розподіл неоднорідного магнітного поля вздовж простору взаємодії клинотрона, що збільшує довжину траєкторій електронів пучка у шарі ефективного ВЧ поля. За результатами розрахунків створено магнітні системи, що фокусують, та експериментально отримано генерацію в клинотронах субмм діапазону зі зменшеними значеннями стартового струму.
3. Вперше теоретично та експериментально знайдено режим гібридних об'ємно-поверхневих хвиль в закритому хвилеводі з багатоступеневою гребінкою, що мають унікальні властивості:
  - а. показано існування міжтипової взаємодії об'ємно-поверхневих мод у закритому хвилеводі з багатоступеневою гребінкою;
  - б. отримано генерацію на об'ємно-поверхневій хвилі з позитивною груповою швидкістю при відсутності провалів потужності в широкому діапазоні частот за наявності гістерезису по напрузі.
4. Вперше розглянуто вплив додаткових омічних втрат, що викликані шорсткістю поверхні електродинамічної системи й осіданням електронного пучка на гребінку на електронно-хвильову взаємодію у клинотронах субмм діапазону. Показано, що у порівнянні з імпульсним режимом, в постійному клинотронному режимі розігрів гребінки електронним потоком призводить до зменшення швидкості зростання вихідної потужності з електронним струмом.
5. Вперше проаналізовано вплив відбиття та трансформації хвиль у надрозмірному резонаторі на вихідні характеристики клинотрона:
  - а. показано, що трансформація поверхневої хвилі у об'ємну приводить до резонансного характеру генерації в субмм клинотронах із великими омічними втратами;

- б. показано, що за допомогою короткозамикаючого поршня в області колектора або інших параметрів електродинамічної системи можливо управління перерозподілом енергії, що поширюється у вихідний хвилевід і анодну апертуру гармати та відбивається у простір взаємодії.
6. Теоретично та експериментально знайдено умови збудження генерації в низьковольтних мазерах на циклотронному резонансі:
- вперше в МЦР у слабонеоднорідному магнітному полі експериментально отримано генерацію, що збуджується низьковольтним полігвинтовим електронним пучком;
  - вперше експериментально отримано ефективну генерацію в гіротроні з двома низьковольтними гвинтовими електронними пучками у діапазоні частот 300-400 ГГц.
7. Вперше запропоновано електронно-оптичну систему з формування стрічкових гвинтових електронних потоків для дводзеркальних МЦР з перестроюванням частоти генерації в широкому діапазоні частот. Розраховано та виготовлено планарні магнетронно-інжекторні гармати (МІГ); за допомогою моделювання й експериментально отримано та проведено транспортування в планарному та конфокальному резонаторах широких стрічкових гвинтових електронних потоків із параметрами, які дозволили отримати ефективну генерацію в широкій смузі частот.
8. З використанням методу пропорційно-інтегрально-диференційного управління напругами, що живлять електронно-оптичні системи вакуумних електронних приладів типу гіротрон та клинотрон, вперше отримано параметри випромінювання, що відповідають вимогам спектроскопії ДПЯ-ЯМР. Запропоновано та практично реалізовано стабілізацію параметрів випромінювання гіротронів з триелектродною МІГ за допомогою двоконтурного методу пропорційно-інтегро-диференційного управління струмом і пітч-фактором пучка, що дозволило отримати нестабільність потужності генерації менше 0,1% у гіротронах для ДПЯ ЯМР спектроскопії з безперервною тривалістю експериментів більше 30 годин.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у створенні генераторів мм та субмм діапазонів, що знайшли застосування у провідних світових наукових центрах у системах ДПЯ-ЯМР спектроскопії (Far-Infrared Research Center, Університет м. Фукуї, Японія); у системі з дослідження квазіоптичної лінії передачі стеларатора W7-X (Max Plank Institute for Plasma Physics, м. Грайфсвальд, Німеччина) та інших центрах ЕС, США та Китаю. Отримані результати в подальшому дозволять створення генераторів суб-ТГц діапазону з покращеними вихідними характеристиками, що може бути практично застосовано в дослідженнях у біології, медицині, фізиці плазми, системах ТГц бачення, зв'язку та інше.

Отримані результати із дослідження низьковольтних режимів роботи МЦР дали можливість розробити компактні високостабільні генератори, які було застосовано у дослідженнях біологічних зразків за допомогою спектрального аналізу ДПЯ-ЯМР в світових лабораторіях (Far-Infrared Research Center, Університет м. Фукуї, Японія та Інституті протеїнових досліджень Університету м. Осаки, Японія).



Отримані результати з розробки планарних магнетронно-інжекторних гармат можуть бути застосовані у розробці гіротронів із перестроюванням частоти в широкій смузі.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертація є узагальненням результатів досліджень, що було ініційовано автором або виконано під його керівництвом та за його безпосередньою участю. Автор особисто провів аналіз стану досліджень у галузі розробки компактних електронно-вакуумних приладів міліметрового та субміліметрового діапазонів із підвищеними рівнями стабільності параметрів випромінювання [6, 10]. В опублікованих разом зі співавторами роботах [1-5, 7-9, 11-42] особистий внесок дисертанта полягав у виборі й обґрунтуванні фізичних моделей механізмів електронно-хвильової взаємодії, у проведенні чисельного моделювання та експериментальних дослідженнях. Автор сформулював наукову задачу, здійснив планування й особисто брав участь в експериментальних дослідженнях на всіх етапах: процесу генерації в МЦР [1,7,9,12,15,18,22,25,26,28,30,31,34,41]; формуванні та транспортуванні щільних стрічкових електронних потоків у резонаторах клинотронів [2-4,23,24,39,40]; процесу генерації в клинотронах [5,8,11,16,17,20,21,27,29,32,33,35-38,42]; стабілізації параметрів випромінювання електронно-вакуумних генераторів [6,10,13,14].

В роботах [1,9,22,25,31,41] автором теоретично й експериментально досліджено механізм азимутально-фазового групування електронів гвинтового електронного пучка у низьковольтному МЦР. В роботах [2,3,4,5,8,16,17,18,20,24,29,35,36,37] автором особисто проведено аналіз процесів транспортування електронних потоків у клинотроні та гіротроні. В роботах [7,12,15,26,28,30,34] автором запропоновано геометрію та принцип дії електронної гармати, що формує стрічковий гвинтовий електронний потік; в роботах [23,33,39,40] запропоновано принцип підвищення ефективності взаємодії у клинотроні з електронним потоком із профілюванням повздожніх швидкостей. В [21,38] автором запропоновано ідею застосування матриці розсіювання в теорії субміліметрового клинотрона з надрозмірним резонатором. В [8,11,19,27,32,42] автором особисто запропоновано та розраховано резонатор 100 ГГц та 140ГГц клинотронів з гібридними хвилями. В [6,10,13,14] автором запропоновано та здійснено схему стабілізації параметрів гіротрону за допомогою анодної напруги у триелектродній магнетронно-інжекторній гарматі.

Також у роботах, що написано у співавторстві, здобувач брав участь в аналізі фізичних результатів чисельного моделювання та експериментальних досліджень, а також у формулюванні узагальнюючих висновків.

Матеріали публікацій [1, 2, 4, 25–27] були використані співавторами дисертанта в таких кваліфікаційних роботах:

- Пономаренко С.С. Ефективність взаємодії електронних потоків з об'ємно-поверхневими полями в генераторах О-типу. – дис. ... канд. фіз.-мат. наук. – 01.04.04 – фізична електроніка. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, Харків, 2014.
- Кишко С.О. Взаємодія низьковольтних полігвинтових електронних потоків з електромагнітними хвилями в МЦР з традиційною і планарною геометріями.

– дис. ... канд. фіз.-мат. наук. – 01.04.04 – фізична електроніка. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, Харків, 2015.

- Ковшов Ю.С. Взаємодія електронних потоків з полями електродинамічних систем ТГц клінотронів підвищеної стабільності. – дис. ... канд. фіз.-мат. наук. – 01.04.04 – фізична електроніка. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України, Харків, 2019.

**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:

- International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Kharkiv, Ukraine, 2012);
- International Conference on Microwave & Telecommunication Technology CriMiCo'2012, (Sevastopol, Ukraine, 2012);
- XV международная зимняя школа-семинар по электронике СВЧ и радиофизике (Росія, Саратов, 2012);
- International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (Kharkiv, Ukraine, 2013);
- International Conference on Infrared, Millimeter and THz waves (Mainz on the Rhine, Germany, 2013);
- International Conference on Antenna Theory and Techniques (Odessa, Ukraine, 2013);
- IEEE International Vacuum Electronics Conference (Monterey, USA, 2014);
- International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Lviv, Ukraine, 2016);
- IEEE International Vacuum Electronics Conference (Monterey, USA, 2016);
- International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (Kharkiv, Ukraine, 2016);
- International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Kyiv, Ukraine, 2018);
- IEEE 10th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, IEEE Ukrainian Microwave Week (Kharkiv, Ukraine, 2020).

**Публікації.** Результати, які представлено в цій дисертації, опубліковано в 42 наукових роботах [1–42]: у 22 статтях у профільних наукових журналах [1–22] і в 20 тезах доповідей на міжнародних конференціях [23–42].

**Структура і 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 354 сторінки. Вона містить 221 рисунки (з них 33 розміщені на 16 окремих сторінках), 16 таблиць та 370 бібліографічних посилань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У розділі 1 міститься аналітичний огляд результатів досліджень з розробки компактних ефективних електронно-вакуумних генераторів електромагнітного випромінювання міліметрового та субміліметрового діапазонів. Цей огляд дав підставу констатувати, що електронно-вакуумні прилади (ЕВП), принцип дії яких базується на випромінюванні Вавилова-Черенкова, мають найширші діапазони перестроювання частоти, але досить малу ефективність у короткохвильовій частині міліметрового та у субмм діапазонах. У першому підрозділі розглянуто потужний різновид ЛЗХ-клинотрон, що генерує декілька Ватт у безперервному режимі в діапазоні частот 90-100 ГГц з ККД 0,5-1%, та у діапазонах вище 300 ГГц забезпечує вихідну потужність випромінювання на рівні 100м Вт з ККД порядку 0,01% [8\*]. Різке спадання рівнів вихідної потужності приладів на сповільнених хвилях пов'язано як з технологічними обмеженнями у процесі виготовлення елементів та вузлів конструкції приладів, так і суттєвим зниженням ефективності електронно-хвильової взаємодії, що обумовлено низкою факторів: зменшенням висоти ефективного шару ВЧ поля поверхневої хвилі над системою, що сповільнює рух хвиль; труднощами у формуванні та транспортуванні щільних електронних пучків з малими розкидами швидкостей та енергій електронів, а також ростом омичних втрат поверхневої хвилі з підвищенням робочої частоти. Одним з шляхів підвищення ефективності виводу енергії з простору взаємодії клинотронів є перехід до роботи на просторових гармоніках швидких хвиль, що відриваються від багатоступеневих гребінок [9\*]. У другому підрозділі розглянуто найпотужніші в діапазонах частот 100-1000 ГГц прилади класу МЦР, що відрізняються від черенковських приладів відсутністю дрібнорозмірних елементів у просторі взаємодії [10\*]. Принцип дії МЦР, а саме азимутально-фазового групування електронів гвинтових пучків, засновано на релятивістській залежності маси електронів від кінетичної енергії [11\*]. Оскільки для значної кількості практичних застосувань, таких як ЯМР-ДПЯ спектроскопія, ТГц бачення та інших, достатніми є рівні потужності випромінювання від 100 мВт до декількох Ватт в діапазонах частот 130-1000 ГГц, постає задача розробки компактних МЦР на низькі напруги, що прискорюють електронні пучки. Також важливою задачею є підвищення діапазону перестроювання робочою частоти МЦР генераторів, що може бути реалізовано як в системах зі складними відкритими циліндричними резонаторами змінної довжини [6\*], так і у дводзеркальних резонаторах зі стрічковими ГЕП [12\*]. Третій підрозділ присвячено аналізу методів підвищення стабільності параметрів випромінювання ЕВП. Показано, що, виходячи з аналізу характеристик випромінювання ЕВП у режимі вільної генерації, актуальною задачею є створення додаткових кіл зворотного зв'язку для підвищення стабільності потужності та частоти

випромінювання у разі безперервної генерації у ЯМР-ДПЯ експериментах тривалістю декілька годин.

В кінці першого розділу наведено короткі висновки про сучасний стан розробок компактних низьковольтних електронно-вакуумних приладів мм та субмм діапазонів із перестроюванням частоти та сформульовано напрями досліджень, спрямованих на підвищення ефективності електронно-хвильової взаємодії та стабільності параметрів випромінювання зазначених приладів, розвитку яких присвячена дисертація.

У розділі 2 наведено результати досліджень з формування та транспортування щільних стрічкових потоків у клинотронах із несиметричною ЕОС в магнітних полях зі слабою неоднорідністю. У розділі описано ЕОС та магнітні системи, що фокусують пучки (МФС), клинотронів мм та субмм діапазонів. Основну увагу приділено формуванню стрічкових електронних потоків з оптимальними параметрами для підвищення ефективності електронно-хвильової взаємодії в електродинамічній системі клинотронів.

У першому підрозділі сформульовано основні задачі, що вирішувалися у розділі. У другому підрозділі наведено конструкції ЕОС клинотронів та надано результати траєкторного аналізу сформованих стрічкових електронних пучків у просторі взаємодії клинотронів мм та субмм діапазонів. У разі малих щільностей пучка, коли первіанс менше  $0,1 \text{ мкА/В}^{3/2}$ , розкид швидкостей складає  $0,2\%$ , що зумовлено впливом анодної лінзи. Первіанси клинотронів у робочих режимах складають  $0,2\text{-}2 \text{ мкА/В}^{3/2}$ , що відповідає розкиду  $0,4\text{-}0,8\%$ .

Третій підрозділ присвячено розробці МФС для формування та транспортування щільних стрічкових електронних потоків клинотронів мм та субмм діапазонів із незначними спотвореннями геометрії та енергетичних параметрів пучків. Розроблена МФС складається з двох магнітних полюсів, які розміщено в залізу обойму, та кожен полюс складається з двох магнітів: центрального, коли вектор намагніченості спрямований уздовж осі системи, і радіально намагніченого магніту. На рис.1 зображено розподіли повздовжньої компоненти індукції магнітного поля у виготовленій МФС із зазором  $32 \text{ мм}$  та діаметром центральних полюсів  $28 \text{ мм}$ .

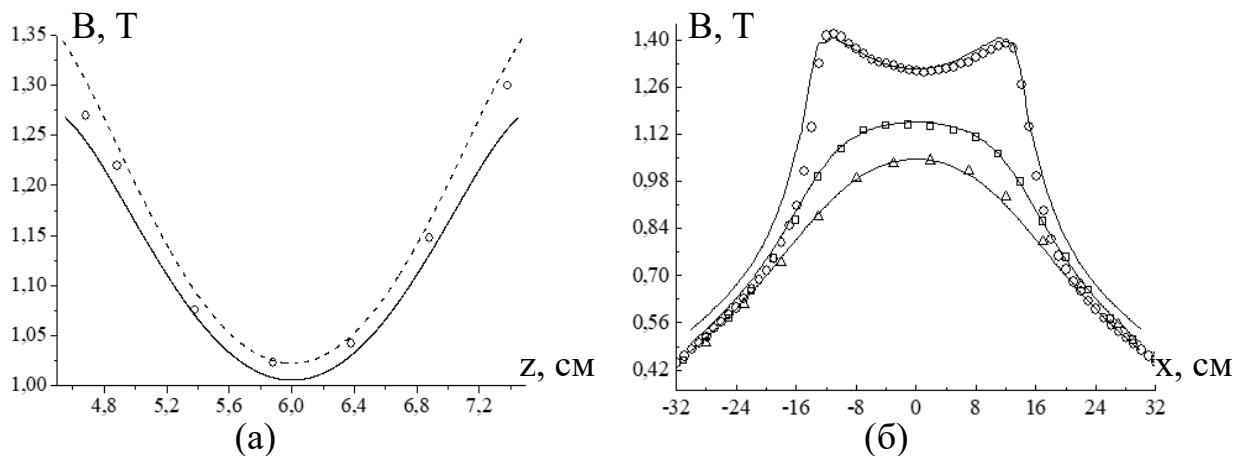


Рисунок 1 – Розподіл повздовжньої компоненти індукції магнітного поля уздовж осі (а) та в зазорі МФС (б): чисельне моделювання (—) й експериментальні вимірювання (точки)

Характер транспортування щільного стрічкового електронного потоку в заданих електричних (ЕОС) і магнітних (МФС) полях було досліджено за допомогою траєкторного аналізу, що було проведено чисельними методами та порівняно з результатами моделювання в коді CST PS [3]. Показано, що неоднорідність поздовжньої компоненти індукції магнітного поля МФС призводить до максимального радіусу пульсацій електронного пучка, що менше товщини ефективного шару ВЧ поля поверхневої хвилі у діапазоні частот до 400 ГГц. Дана величина пульсацій буде зберігатися при налаштуванні положення генератора в області діаметром 4 мм навколо осі МФС.

Наведений аналіз транспортування щільного стрічкового електронного потоку в слабонеоднорідному магнітному полі показує, що ефективність електронно-хвильової взаємодії в умовах оптимальної неоднорідності магнітного поля уздовж електродинамічної системи клинотрона підвищується за рахунок збільшення довжини прольоту електронів у ВЧ полі поверхневої хвилі.

У четвертому підрозділі наведено результати експериментальних досліджень клинотронів субмм діапазону з оптимізованими МФС. Клинотрон, що пакетовано в розроблену МФС, в діапазоні частот 345-405 ГГц збуджувався в діапазоні напруги 2,6 – 4,6 кВ з робочим струмом пучка до 195 мА. У разі роботи в однорідному полі електромагніту стартовий струм складав 79 мА, а у разі МФС мінімальне значення пускового струму склало лише 61 мА. Максимум вихідної потужності клинотрона становить 43 мВт в діапазоні частот 370-387 ГГц і в діапазоні 388-400 ГГц потужність становить 20 мВт.

У п'ятому підрозділі, з метою підвищення ефективності електронно-хвильової взаємодії у клинотроні, застосовано стрічкові електронні пучки з профільованим розподілом повздовжніх швидкостей електронів за товщиною пучка. Показано, що профілювання розподілу повздовжніх швидкостей електронів за товщиною пучка залежить від розташування плоского катоду відносно осі анодної лінзи ЕОС клинотрона у присутності зовнішнього магнітного поля. У разі невеликого зсуву катода відносно осі анодної лінзи повздовжні швидкості електронів найбільші у шарів електронного пучка, що рухаються найближче до осі лінзи, та спадають з віддаленням від осі (рис. 2). Електронний пучок у клинотроні рухається під невеликим кутом до поверхні гребінки, тож нижні шари електронного пучка осідають на поверхні гребінки біля хвилеводного виводу, коли верхні шари осідають на кінці гребінки в області колектору. Амплітуда ВЧ поля поверхневої хвилі вздовж гребінки у субмм клинотроні зростає від колектора у напрямку хвилеводного виводу (рис. 3.а). Згідно з умовами синхронізму електронного пучка з поверхневою хвилею, різниця швидкості електронів та фазової швидкості хвилі збільшується зі збільшенням амплітуди ВЧ поля (рис. 3.б). Показано, що згідно розподілу амплітуди ВЧ поля поверхневої хвилі вздовж гребінки, для підвищення ефективності електронно-хвильової взаємодії у клинотроні необхідно формувати електронні пучки, у яких повздовжня швидкість електронів найбільша у нижніх шарів пучка і спадає за товщиною пучка (рис. 2.б).

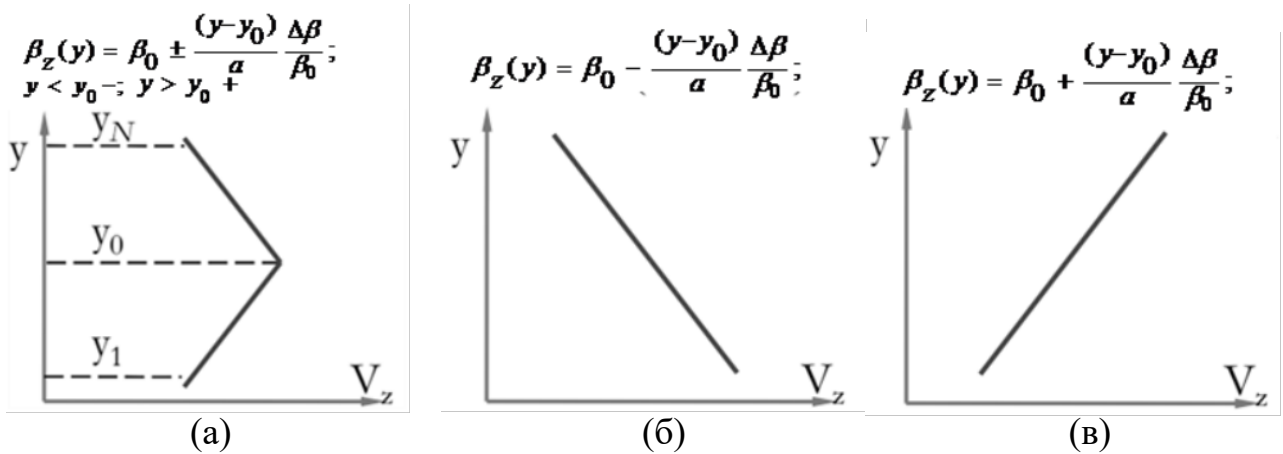


Рисунок 2 – Профіль поздовжніх швидкостей електронів за товщиною пучка: а) симетрична ЕОС, б) емітер розташовано вище осі анодної лінзи, в) емітер нижче осі анодної лінзи

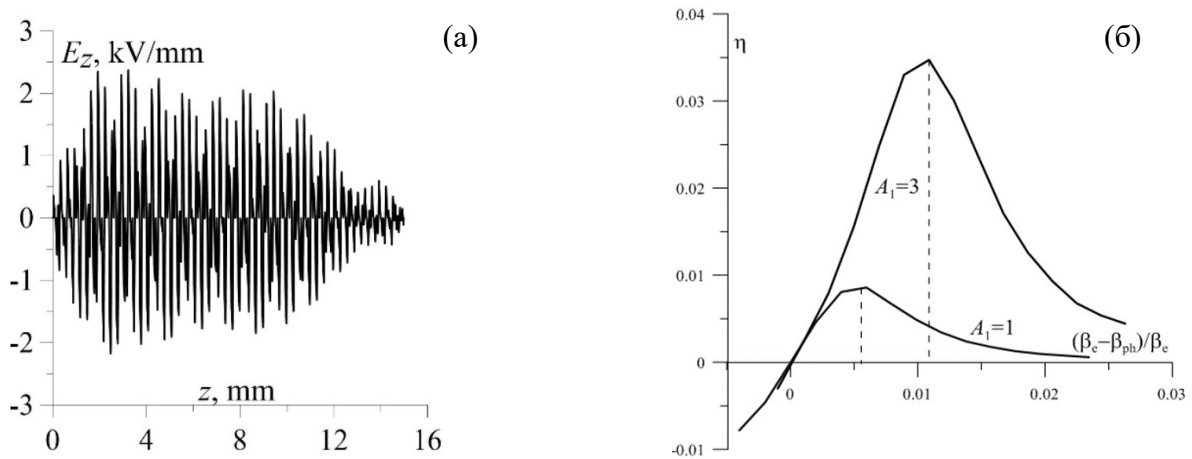


Рисунок 3 – Розподіл амплітуди ВЧ поля поверхневої хвилі вздовж гребінки (а) та ефективність електронно-хвильової взаємодії від параметра розсинхронізму для двох значень амплітуди поля (б)

У результаті моделювання показано, що завдяки залежності оптимального розсинхронізму від амплітуди ВЧ поля, вихідна потужність клинотронів зростає у разі профільованого розподілу швидкостей електронів пучка, як показано на рис. 2.б, у порівнянні з одношвидкісним потоком, та різко падає у разі неоптимального розподілу як на рис. 2.в.

У шостому підрозділі продемонстровано можливість збудження багаточастотного режиму генерації клинотронів у разі профілю повздовжніх швидкостей електронів пучка, як показано на рис. 2.в, а також за умови суттєвого перевищення робочого струму пучка над стартовим. Моделювання електронно-хвильової взаємодії продемонструвало збудження режиму багаточастотної генерації у разі несиметричної ЕОС 300 ГГц клинотрона з профільованим розподілом швидкостей електронів пучка (рис. 2.в), в той час як симетричний розподіл (рис. 2.а) призводить до одночастотного режиму з тою ж енергією пучка.

**Розділ 3** дисертаційної роботи присвячено дослідженню впливу омичних втрат, а також відбиття та трансформації мод у надрозмірних резонаторах клинотронів на вихідні характеристики генераторів. У конструкції клинотрона, на відміну від ЛЗХ, немає поглинач в області колектору, що зумовлює резонансну

залежність вихідної потужності від частоти клинотронів мм діапазону завдяки відбиттям поверхневої хвилі від неоднорідностей на кінцях гребінки. У субмм діапазоні омичні втрати поверхневої хвилі суттєво зростають зі зростом частоти, що зумовлює зменшення впливу відбиття поверхневої хвилі та істотне зниження рівнів вихідної потужності клинотронів. Перший підрозділ присвячено методам розрахунку дисперсійних характеристик електродинамічних систем клинотронів у двовимірному наближенні. У другому підрозділі досліджено залежність омичних втрат поверхневої хвилі від шорсткості поверхні гребінки та від розігріву елементів гребінки внаслідок осідання електронного пучка у клинотронному режимі. Шорсткість поверхні гребінок досліджувалася експериментально за допомогою мікроінтерферометра Лініка. Показано, що гребінки, виготовлені методом електроерозійної обробки, мають середню арифметичну величину неоднорідностей поверхні в діапазоні 2,5-5 мкм в той час як для гребінок, що виготовлені з набору пластин з мідної фольги, величина неоднорідностей поверхні на порядок менша. Отримані експериментальні дані було використано у визначенні електропровідності матеріалу гребінок для різних частотних діапазонів за допомогою формули Хаммерштада-Бекадаля:

$$\sigma(R_a) = \frac{\sigma_0}{\left\{1 + 2 \arctan \left[ 1,4 \left( R_a / \delta \right)^2 \right] / \pi \right\}^2} \quad (1)$$

де  $\delta$  - глибина скін-шару,  $R_a$  - середнє арифметичне величини неоднорідностей поверхні (шорсткість),  $\sigma_0 = 5,7 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ . Дослідження залежності електропровідності матеріалу гребінки від розігріву у разі осідання електронного пучка на елементи системи проведено у результаті моделювання двовимірного стаціонарного рівняння теплопровідності з використанням закону Відемана – Франца. В результаті дослідження залежності провідності матеріалу гребінки від шорсткістю поверхні та від нагріву внаслідок осідання електронного пучка показано, що такі додаткові омичні втрати призводять до суттєвого зниження швидкості зростання вихідної потужності випромінювання від електронного струму в постійному клинотронному режимі на відміну від імпульсного режиму, що добре узгоджується з експериментальними результатами. Зокрема, урахування значення чистоти поверхні гребінок клинотронів продемонструвало, що розміри неоднорідностей перевищують глибину скін шару, починаючи з частот 100-150 ГГц, що обумовлює різке збільшення омичних втрат поверхневих хвиль. У третьому підрозділі досліджено вплив допусків виготовлення та юстування елементів конструкцій клинотронів на вихідні характеристики приладів. Проведені порівняння результатів розрахунків з результатами експериментальних досліджень більш ніж 300 клинотронів діапазону 110-140 ГГц, які було виготовлено на ламповому підрозділі дослідного виробництва ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, показали, що у клинотронах з оптимальним набігом фази на період гребінки стартовий струм склав 50 мА і для струму пучка в діапазоні 150-200 мА максимальна вихідна потужність випромінювання досягає значень 2-

2,25 Вт. У четвертому підрозділі, з метою урахування відбиття та трансформації хвиль в надрозмірних резонаторах клинотронів, запропоновано модель, що включає матриці розсіювання складних хвилевідних з'єднань в області хвилевідного виводу та в області колектора [13\*]. Завдяки коефіцієнтам матриць розсіювання отримано вирази для взаємної трансформації поверхневої хвилі, яка збуджена електронним пучком, і об'ємних коливань резонатора, що відбувається на кінцях гребінки (рис. 4).

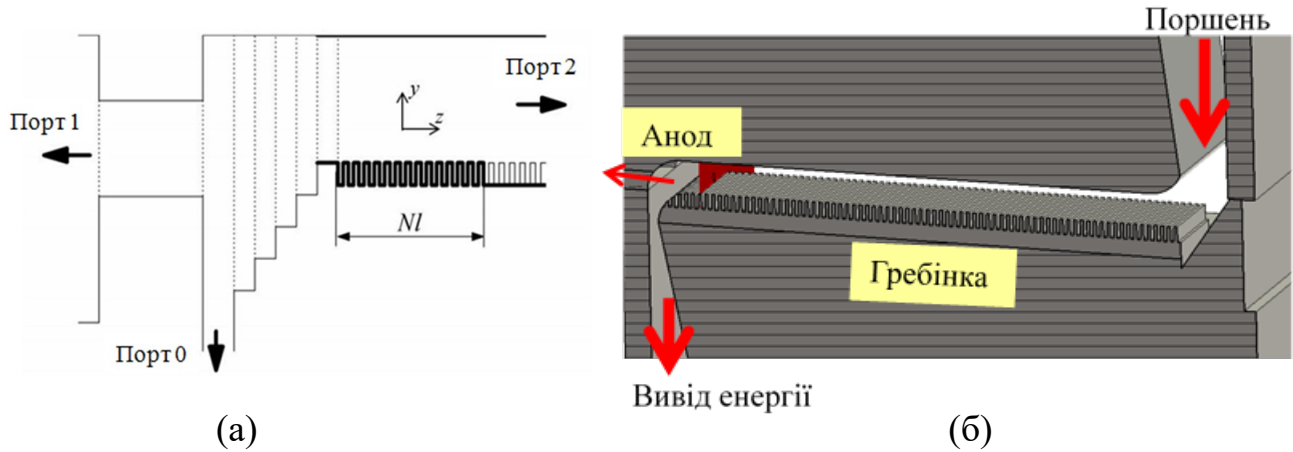


Рисунок 4 – Модель трипортового з'єднання для розрахунку матриці розсіювання в області виводу (а) та схема конструкції резонатора клинотрона мм діапазону (б)

В результаті розрахунків отримано вираз для потужності випромінювання, що потрапляє в вихідний хвилевід:

$$P_{вих} = \sum_m \left| \sum_j S_{02}(m, j, f_0) C_j^-(0, t) + \sum_j \frac{dS_{02}(m, j, f_0)}{df} \frac{\partial C_j^-(0, t)}{\partial t} \right|^2 \quad (2)$$

де  $S_{02}(m, j, f_0)$  – елементи матриць розсіювання, що відповідають поширенню хвиль з простору взаємодії у вихідний хвилевід,  $C_j^-(0, t)$  – амплітуди хвиль, що поширюються у просторі взаємодії назустріч електронному пучку. Також було отримано вираз для потужності випромінювання, що поширюється з простору взаємодії у анодну апертуру:

$$P_{анод} = \sum_m \left| \sum_j S_{12}(m, j, f_0) C_j^-(0, t) + \sum_j \frac{dS_{12}(m, j, f_0)}{df} \frac{\partial C_j^-(0, t)}{\partial t} \right|^2 \quad (3)$$

де  $S_{12}(m, j, f_0)$  – елементи матриць розсіювання, що відповідають поширенню хвиль з простору взаємодії у анодну апертуру. У результаті аналізу впливу умов відбиття та трансформації хвиль в області колектору на електронно-хвильову взаємодію було продемонстровано, що оптимізація геометрії колектору або положення короткозамикаючого поршня дозволяє на фіксованій частоті підвищувати ефективність взаємодії, а також впливати на перерозподіл



потужностей випромінювання, що поширюється у вихідний хвилевід та анодну апертуру. У шостому підрозділі проведено порівняння результатів моделювання з результатами експериментальних досліджень клинотронів у діапазонах 175-205 ГГц та 285-305 ГГц (рис. 5). Максимальна потужність клинотронів у діапазоні частот 175-205 ГГц досягає 0,7-1 Вт, у той час як максимальна потужність клинотронів діапазону частот 285-305 ГГц знаходиться в діапазоні 0,1-0,25 Вт за однакових енергетичних параметрів стрічкових електронних пучків.

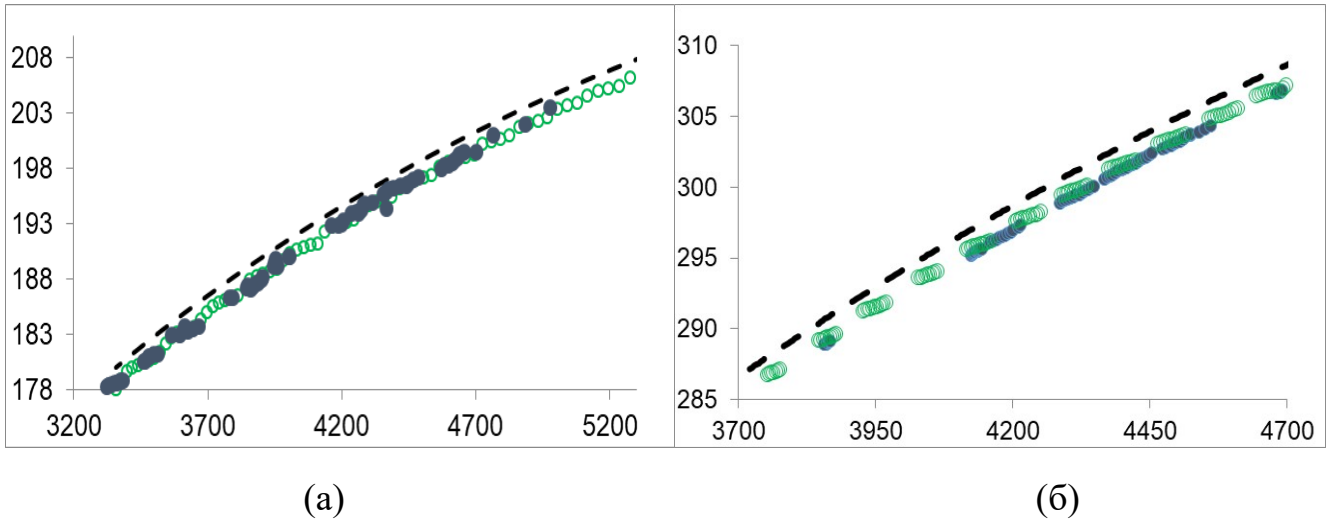


Рисунок 5 – Порівняння результатів моделювання з експериментальними результатами для 200 ГГц клинотрона (а) та 300 ГГц клинотрона (б): пунктир – дисперсія, кружки – моделювання, точки – експериментальні данні

В результаті аналізу впливу відбиття та трансформації хвиль у надрозмірному резонаторі на вихідні характеристики клинотрона, показано, що трансформація поверхневої хвилі у об'ємну призводить до резонансного характеру збудження коливань навіть за наявності суттєвих затухань поверхневих хвиль в електродинамічній системі клинотрона. Завдяки трансформації поверхневої та об'ємних хвиль у місцях з'єднання гребінок з хвилевідними трактами залежність вихідної потужності 300 ГГц клинотрона від частоти є резонансною, що підтверджено результатами експериментальних досліджень.

**Розділ 4** дисертації присвячено дослідженню механізму зворотного зв'язку на об'ємно-поверхневих хвилях, які збуджуються в резонаторі клинотрона з неоднорідною системою, що сповільнює рух хвилі. Такий режим роботи запропоновано з метою зниження впливу ВЧ омичних втрат та підвищення ефективності електронно-хвильової взаємодії в приладах, заснованих на випромінюванні Вавілова-Черенкова. У першому підрозділі розглянуто випромінювання модульованого електронного пучка, що рухається вздовж поверхні багатоступневих гребінок. Дисперсійна характеристика багатоступневих гребінок складається зі смуг пропускання, коли в першій смузі поширюється поверхнева хвиля, та в вищих смугах – швидкі хвилі, що відриваються від поверхні гребінки [9\*]. Вплив ВЧ омичних втрат на інтенсивність випромінювання хвиль, що відриваються від поверхні багатоступінчастої плоскою гребінки, досліджувався шляхом порівняння

відповідних залежностей випромінювання в дальній зоні без урахування втрат і за наявності втрат в системі. Результати розрахунків показують, що хвилі, які відриваються від поверхні гребінки, мають високу чутливість до введених втрат у порівнянні з випромінюванням Сміта-Парселла. Показано, що інтенсивність випромінювання хвиль, що відриваються від поверхні багатоступінчастої гребінки, в кілька разів перевищує інтенсивність випромінювання Сміта-Парселла. У другому підрозділі розглянуто хвилевід із багатоступеневою плоскою гребінкою. Розрахунки потужності взаємодії електронного пучка з хвилями в вищих смугах пропускання системи, що лежать в діапазоні фазових швидкостей  $0,088 - 0,139 c$ , показали, що у разі малої відстані від поверхні гребінки до верхньої стінки хвилеводу у порівнянні з довжиною хвилі випромінювання, в спектрі присутні тільки хвилі, що витікають, у відповідних смугах пропускання багатоступеневої гребінки. Збільшення відстані призводить до появи в спектрі об'ємних коливань хвилеводу з багатоступеневою гребінкою, та для таких структур з'являються області з нульовою груповою швидкістю не на кінцях зони Бріллюена. В таких системах може спостерігатися явище міжтипового зв'язку коливань одного класу за дотримання відповідних умов [14\*]. Наближення хвильових чисел об'ємної хвилі хвилеводу і хвилі, що відривається від гребінки, призводить до резонансного перетворення двох таких хвиль, коли одночасно існують пов'язані між собою об'ємна і поверхнева хвилі. У точці перетину частина потужності переноситься об'ємними гармоніками, а частина поверхневими, тож такий вид коливань вже не можна вважати суто об'ємним чи поверхневим. У цій точці наявність об'ємної гармоніки приводить до зменшення згасання, а великі амплітуди поверхневих гармонік приводять до відносно великого опору зв'язку. У результаті моделювання 100 ГГц клинотрона з тріступеневою гребінкою було отримано структуру поля для режиму об'ємно-поверхневого коливання (рис. 6). Параметри тріступеневої гребінки:  $l = 0,28$  мм,  $L = 3l$ ,  $h_0 = 0,6$  мм,  $h_3/h_0 = 1,3$ , відстань між поверхнею гребінки та верхньою стінкою хвилеводу  $D = 2,4$  мм. У результаті моделювання в коді CST PS показано, що в резонаторі клинотрона збуджувалися гібридні об'ємно-поверхневі коливання електронним пучком зі струмом 100 мА та напругою 3,9 кВ. Результати моделювання системи з тріступеневою гребінкою показали, що одночастотна генерація спостерігається як у випадку конкуренції двох коливань, що належать до різних смуг пропускання гребінки, так і в разі коливань з різним числом варіацій поля уздовж системи. Встановлення в системі коливань, що відповідають другій смузі пропускання гребінки, пояснюється більшою потужністю взаємодії в порівнянні з третьою смугою пропускання. У четвертому підрозділі наведено результати експериментального дослідження параметрів випромінювання клинотрона з тріступеневою гребінкою у діапазоні частот 80-110 ГГц. Резонатор експериментального генератора має прямокутний перетин з шириною 7,2 мм і висотою, що змінюється в межах 1,8 - 7 мм. При цьому відстань між поверхнею гребінки та верхньою стінкою резонатора  $D$  змінюється в діапазоні 0,8 - 6 мм. Для реєстрації як прямих, так і зворотних хвиль, в конструкції є два хвилевідні виводи енергії.

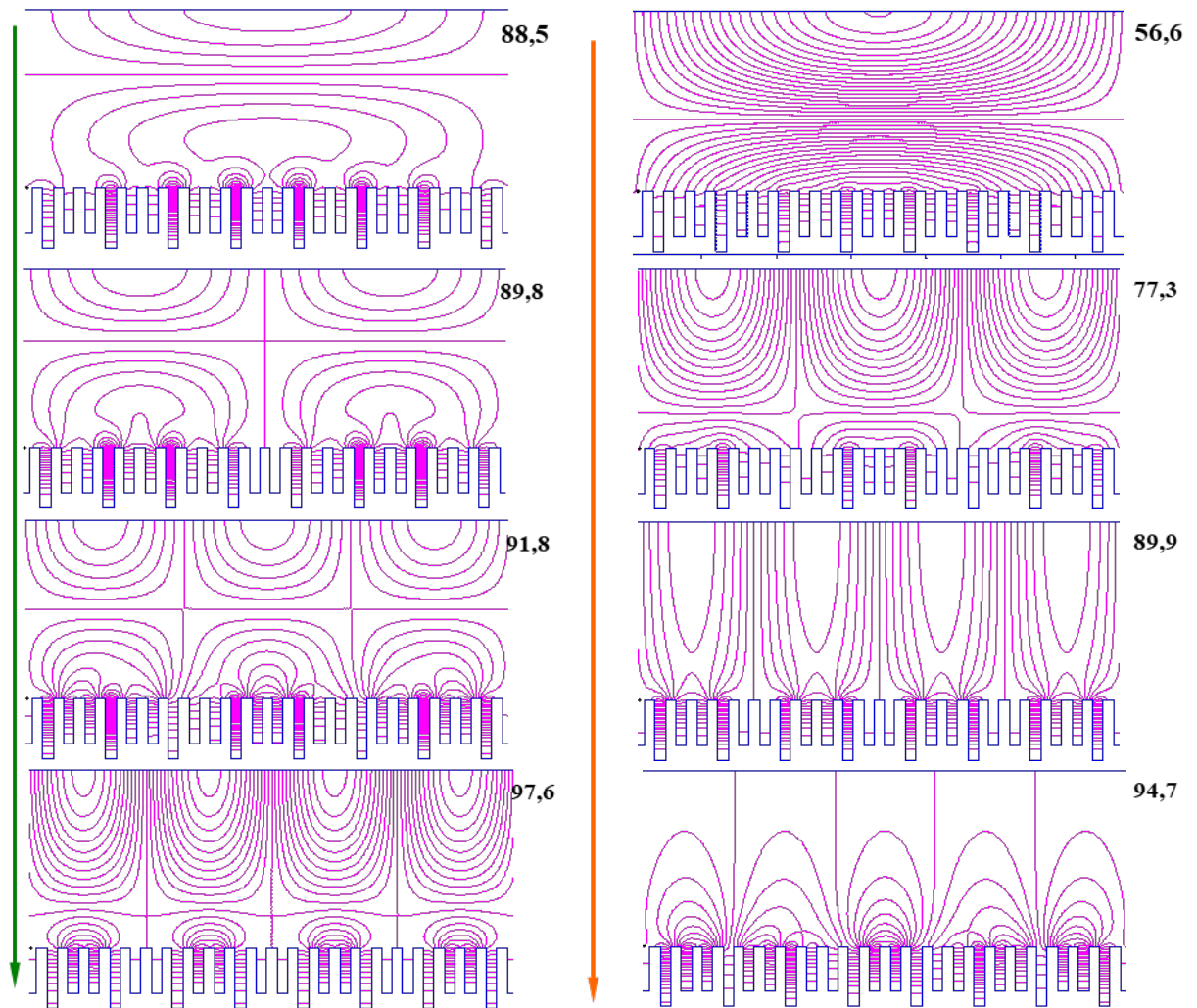
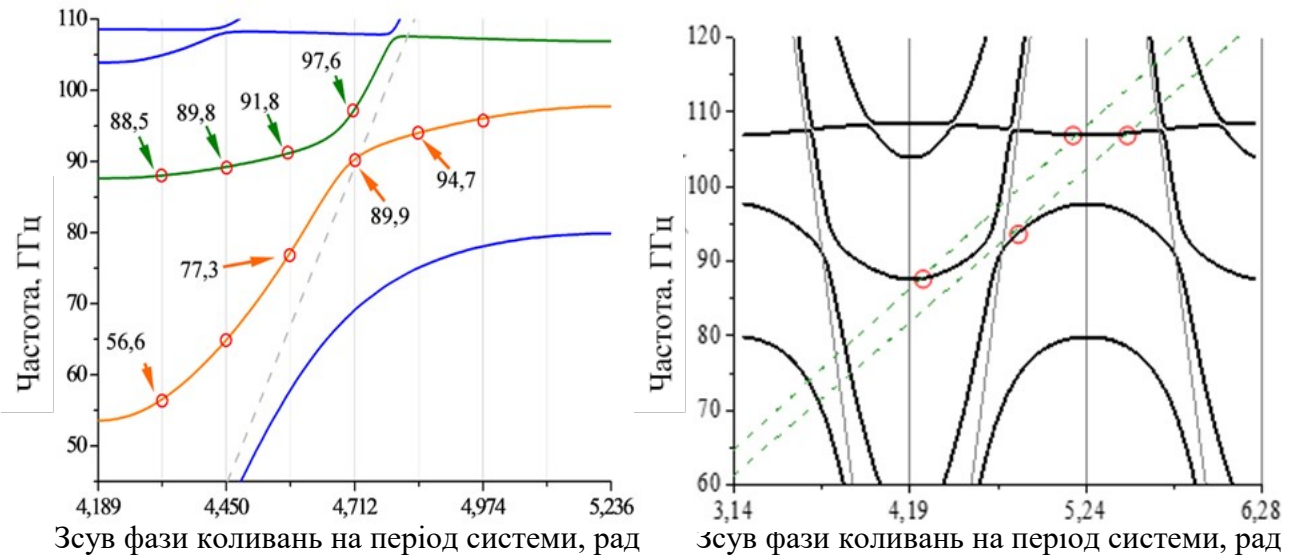


Рисунок 6 – Структура ВЧ поля поблизу області міжтипного зв'язку коливань у резонаторі клинотрона з триступеневою гребінкою

Для реєстрації швидких хвиль розроблено дифракційний вивід енергії, що розташовано у верхній стінці резонатора, з щілиною зв'язку прямокутного перетину  $3,6 \times 0,1$  мм. В експериментах з висотою хвилеводу  $0,8$  мм значення стартових струмів генерації коливань в першій смузі пропускання системи (75-81 ГГц) склали близько 12-25 мА, потужність генерації в безперервному режимі близько 2 Вт спостерігалася за робочих струмів електронного пучка 100-150 мА. Перестроювання напруги пучка в діапазоні 3,13-3,52 кВ, що відповідає другій смузі пропускання, продемонструвало перестроювання потужності випромінювання від частоти генерації без розривів у смузі завширшки 3 ГГц. У п'ятому підрозділі наведено результати експериментальних досліджень 130 ГГц клинотрона як з однорідними, так і з чотириступеневими гребінками для ЯМР-ДПЯ спектроскопії. Період однорідної гребінки  $0,21$  мм та висота ламелі  $h=0,48$  мм забезпечують електронне перестроювання частоти генерації в діапазоні 120-140 ГГц з достатнім опором зв'язку. 130 ГГц клинотрон з чотириступеневою гребінкою було розроблено для роботи в діапазоні напруги 2,5-4 кВ зі струмом електронного пучка до 150 мА, що відповідає величинам параметрів просторового заряду  $QC$  і  $CN$  близьких до 1,0 і 0,5 відповідно та рівням вихідної потужності до 1,5 Вт. Оптимальний порядок неоднорідності гребінок було обрано у відповідності до оптимального зсуву фази на період системи 130 ГГц клинотрона [3\*]. Виготовлені 130 ГГц клинотрони з однорідною та чотириступеневою гребінками експериментально було досліджено як в лабораторній магнітній системі (індукція магнітного поля досягає 1,31Т в зазорі 35 мм), так і в компактній МФС з постійних магнітів. Діапазон робочих частот клинотрона з однорідною гребінкою склав 125-135 ГГц, та максимум потужності спостерігався на частотах в інтервалі 130,12-130,7 ГГц зі значенням стартового струму в постійному режимі не вище 50 мА. Порівняння результатів експериментального дослідження 130 ГГц клинотрона з чотириступеневою гребінкою з розрахованою дисперсійною характеристикою та залежність вихідної потужності у робочому діапазоні показано на рис. 7.

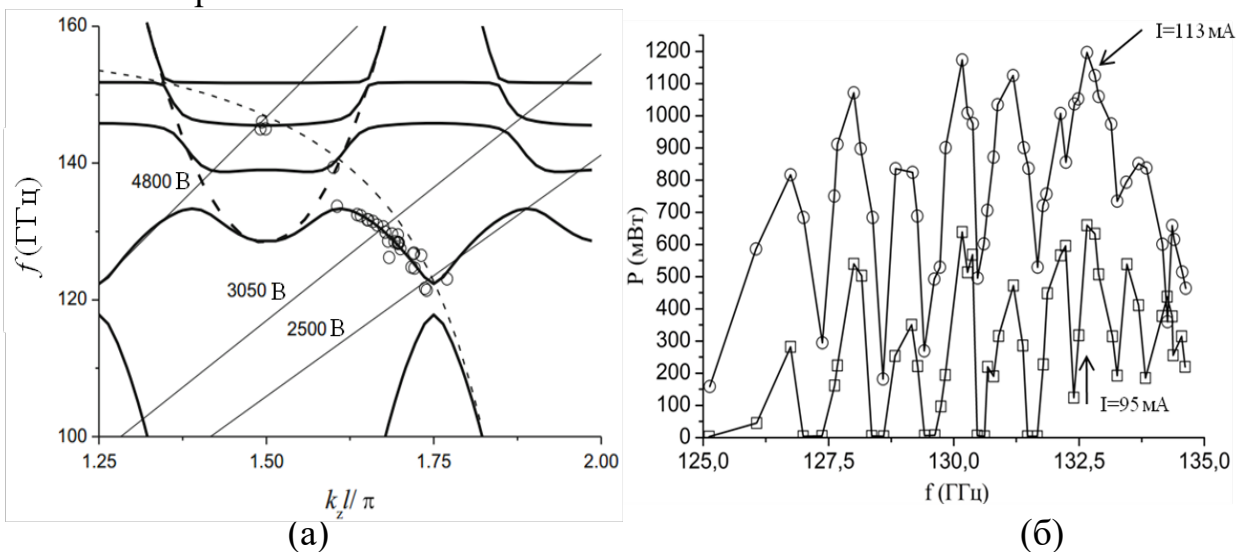


Рисунок 7 – Експериментальні результати 130 ГГц клинотрона з чотириступеневою гребінкою (точки) на графіку з дисперсіями (пунктирні лінії – дисперсії однорідної гребінки та об'ємної хвилі хвилеводу) та залежність вихідної потужності 130 ГГц клинотрона з однорідною гребінкою від частоти (б)

Дослідження проводилося у вищих смугах гребінки, що відповідає діапазону напруги пучка 2,5-4,8 кВ. Гібридні об'ємно-поверхневі коливання було збуджено поблизу точок, де можлива міжтипowa взаємодія хвиль різної природи (хвилі, що відриваються від поверхні неоднорідної гребінки у вищих смугах, та об'ємна хвиля хвилеводу з гребінкою) в резонаторі клинотрона з чотириступеневою гребінкою. Розроблено компактні МФС з магнітним полем в зазорі 0,5-0,8 Т, що дозволило знизити масу пакетованого 130 ГГц клинотрона до 2,5 кг.

**Розділ 5** дисертації присвячено підвищенню ефективності взаємодії та розширенню діапазону перестроювання частоти у низьковольтних мазерах на циклотронному резонансі. У першому підрозділі підкреслено актуальність задач, що вирішувалися у розділі. У другому підрозділі наведено результати досліджень низьковольтної генерації в МЦР з адиабатичною магнетронно-інжекторною гарматою (МІГ) та відкритим резонатором у формі відрізка циліндричного хвилеводу зі звуженнями на кінцях. У результаті траєкторного аналізу в кодах EGUN та CST PS було розроблено МІГ з кутом нахилу катода  $18^\circ$  відносно осі системи (рис. 8) та досліджено енергетичні параметри сформованого гвинтового електронного пучка (ГЕП) з приграничною топологією. За напруги 2,2 кВ МІГ формує ГЕП з величиною пітч-фактора 1,07 і розкидами швидкостей електронів, що не перевищують 19 %. У діапазоні напруги 2-4 кВ пітч-фактор ГЕП змінюється від 1 до 2. Перевищення розкиду поздовжніх швидкостей електронів більше 30% призводить до появи відбитих електронів. Розкид енергетичних характеристик розраховувався як відношення різниці максимальної та мінімальної величин до середнього значення вимірюваного параметра. Розкид електронів за швидкостями збільшується з ростом прискорювальної напруги. За значення напруги 4 кВ кількість відбитих електронів значно зростає, що погіршує характеристики пучка, і призводить до зриву генерації. Циліндричний резонатор завдовжки 240 мм із внутрішнім діаметром 22 мм і кільцевими вставками на кінцях довжиною 10 мм і діаметром 19 мм розраховано на діапазон частот 8-10 ГГц з повною добротністю на робочій моді  $TE_{111}$  приблизно 12000, що було обумовлено використанням теплового соленоїда з магнітним полем в області резонатора до 0,33 Т за значення струму соленоїдів 22 А. Режими збудження мод  $TE_{11q}$  з індексами від 1 до 7 показано на рис. 9. Перебудова частоти генерації МЦР здійснюється зміною величини магнітного поля в діапазоні 0,28-0,31 Т.

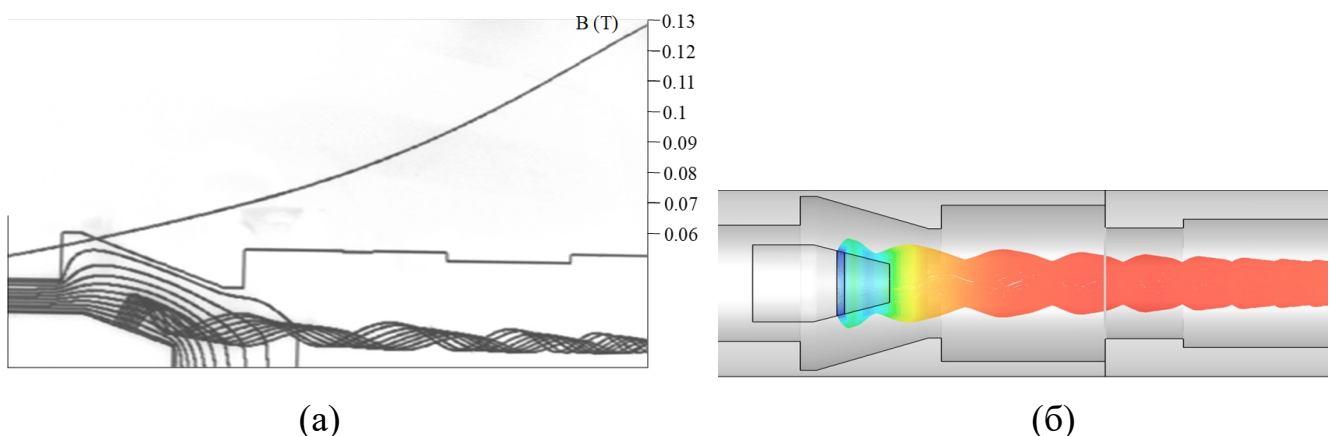


Рисунок 8 – Результати траєкторного аналізу руху гвинтового електронного пучка, що сформовано низьковольтною МІГ, у кодї EGUN (а) та CST PS (б)



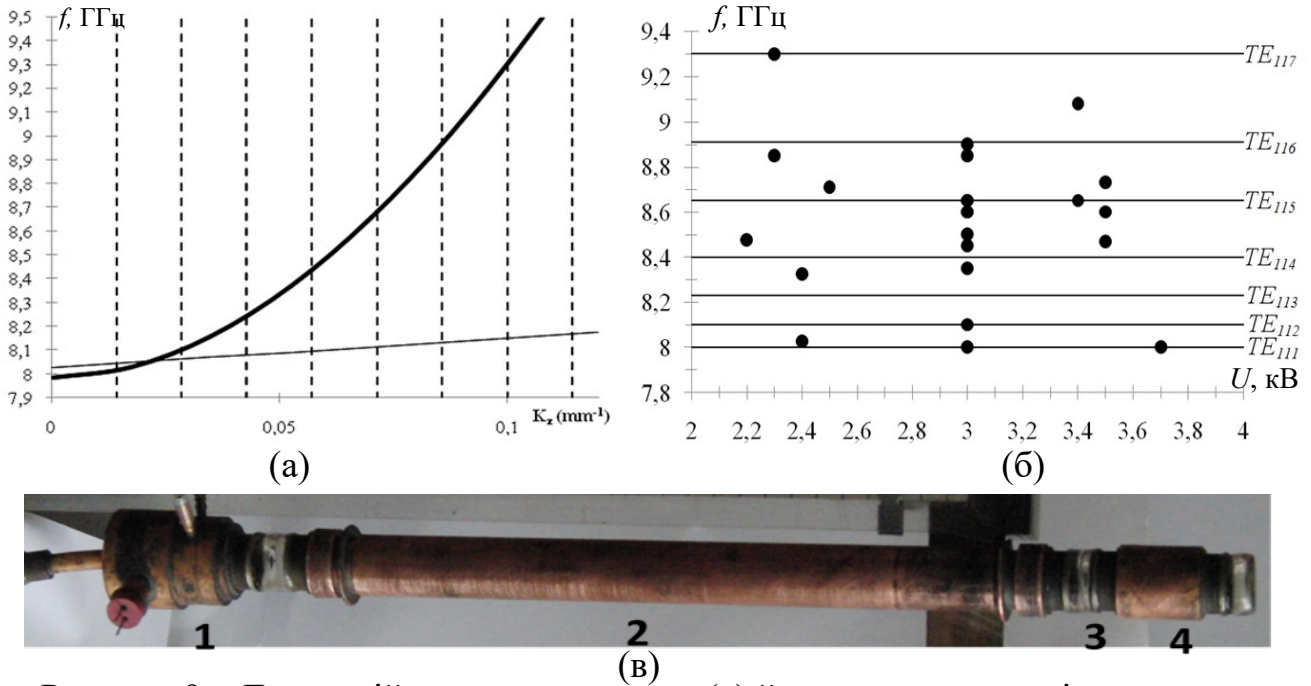


Рисунок 9 – Дисперсійна характеристика (а) й експериментальні результати збудження  $TE_{11q}$  мод резонатора (б) та фотографія низьковольтного МЦР (в): 1 – МІГ, 2 – циліндричний резонатор, 3 – ізолятор, 4 – колектор електронів

За напруги 2,2 кВ релятивістська зміна частоти становить 0,2%, і, згідно з розрахунками [15\*], для забезпечення азимутально-фазового групування електрони повинні зробити в області взаємодії як мінімум 85 обертів в однорідному магнітному полі величиною 0,33 Т. Результати комп'ютерного моделювання показали, що за напруги 2,2 кВ та індукції магнітного поля 0,31 Т електрон робить 25 обертів на довжині 54 мм. Експериментальне дослідження режимів роботи низьковольтного МЦР продемонструвало присутність додаткового механізму, що відбувається у слабонеоднорідному магнітному полі в області взаємодії, подібного до механізму нестійкості негативної маси в класичних гіротронах (рис. 10). В експериментальних дослідженнях магнітна система складалася з двох соленоїдів, розташованих на відстані, зміна якої призводила до зміни розподілу магнітного поля в резонаторі МЦР (рис. 10.а). Збудження коливань в резонаторі МЦР в діапазоні напруги пучка 2-4 кВ з мінімальним стартовим струмом пучка 20 мА відбувалося в слабонеоднорідному магнітному полі, коли відстань між соленоїдами не перевищувала 10 мм. В результаті моделювання електронно-хвильової взаємодії низьковольтного ГЕП та  $TE_{1,1,q}$  мод резонатора було оптимізовано параметри ГЕП та профілю слабонеоднорідного магнітного поля. В результаті експериментальних та теоретичних досліджень було запропоновано додатковий механізм групування електронів ГЕП в просторі взаємодії МЦР, коли електрони, що прискорені ВЧ полем, потрапляють в магнітне поле з меншою індукцією, тоді як електрони, що віддали енергію ВЧ полю, потрапляють в сильніше магнітне поле, як показано на рис. 10.г. Такий механізм групування є додатковим по відношенню до класичного механізму азимутально-фазового групування гіротронів, коли електронні угруповання утворюються завдяки релятивістській залежності маси електронів від їх кінетичної енергії [16\*].

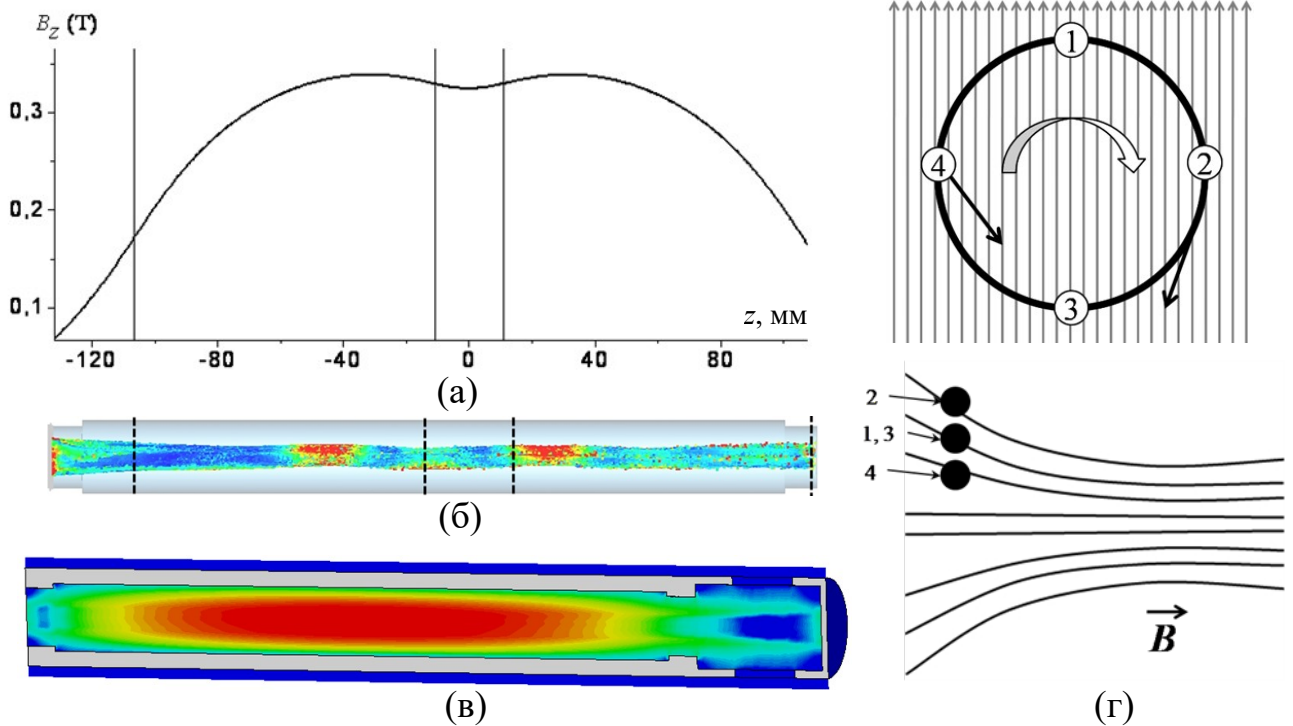


Рисунок 10 – Розподіл повздовжньої компоненти магнітного поля вздовж резонатора МЦР (а), групування електронів ГЕП (б) у разі збудження  $TE_{1,1,1}$  моди резонатора (в) та схема додаткового механізму групування електронів (г)

Третій підрозділ присвячено експериментальному дослідженню низьковольтного режиму роботи двопучкового гіротрону на фундаментальній циклотронній гармоніці у діапазоні частот 300-400 ГГц. Двопучковий гіротрон був розроблений на робочу частоту 780 ГГц на другій циклотронній гармоніці в магнітному полі 15Т [17\*,18\*,18]. Для роботи на моді  $TE_{8,5}$ , МІГ формує ГЕП з радіусами пучків 0,45 мм і 0,71 мм, що збігаються з першим (внутрішній пучок) і другим (зовнішній пучок) максимумами структурного коефіцієнта моди  $TE_{8,5}$ . Розроблена МІГ з параметрами  $U=20$  кВ;  $B=14,5$  Т;  $I \leq 2$  А (із співвідношенням 1:2 внутрішнього та зовнішнього пучків) формує обидва пучки з однаковим пітч-фактором 1,5 та розкидом швидкості 10% [19\*]. За низьких напруг радіуси залишаються майже однаковими, тоді як пітч-фактори та розкиди швидкості стають зовсім різними. Довжина та радіус резонатора з традиційною геометрією є  $L=12$  мм і  $R=1,5$  мм. Кут секції дифракційного виводу енергії становить  $1^\circ$ . У таблиці 1 наведено фундаментальні моди у діапазоні магнітного поля 11-15 Т. Експериментальна залежність генерації випромінювання від магнітного поля свідчить про збудження декількох фундаментальних мод ( $TE_{2,3}$ ,  $TE_{0,3}$ ) за напруги пучка 2,5 кВ та струмі 200 мА, а також ряд фундаментальних мод в діапазоні від 0,3 ТГц до 0,42 ТГц за напруги пучка 5 кВ та струмі 350 мА ( $TE_{2,3}$ ,  $TE_{0,3}$ ,  $TE_{5,2}$ ,  $TE_{3,3}$ ,  $TE_{1,4}$ ,  $TE_{6,2}$ ,  $TE_{4,3}$ ,  $TE_{7,2}$ ,  $TE_{2,4}$ ). Моди  $TE_{5,2}$ ,  $TE_{6,2}$ ,  $TE_{7,2}$  взаємодіють лише із зовнішнім пучком, оскільки їх структурні фактори для внутрішнього пучка є незначними; інші моди взаємодіють з обома пучками. Можна помітити, що у разі напруги пучка 5 кВ збуджуються також моди з великими осьовими індексами, забезпечуючи перестроювання частоти. Генерація моди  $TE_{2,3}$  (317 ГГц)

починається за напруги пучка 2,4 кВ та струмі 200 мА, тоді як генерація моди  $TE_{4,3}$  (403 ГГц) починається за напруги пучка 2,8 кВ та струмі 330 мА.

Таблиця 1 – Збудження фундаментальних мод двопучкового гіротрону

Мода	Частота, ГГц	Магнітне поле, Т
$TE_{8,1}$	306,87	11,06
$TE_{2,3}$	317,12	11,43
$TE_{0,3}$	323,60	11,67
$TE_{5,2}$	334,62	12,06
$TE_{9,1}$	340,72	12,28
$TE_{3,3}$	360,90	13,01
$TE_{1,4}$	372,35	13,42
$TE_{6,2}$	373,27	13,46
$TE_{10,1}$	374,42	13,50
$TE_{4,3}$	403,40	14,54
$TE_{7,2}$	411,36	14,83
$TE_{2,4}$	420,00	14,95

Починаючи з прискорювальної напруги 3,5 кВ, вихідна потужність моди  $TE_{4,3}$  приблизно вдвічі більша, ніж у моди  $TE_{2,3}$ , а за напруги пучка 5,4 кВ досягає потужності 60 Вт, що відповідає 3% ефективності. Таке значення ККД є досить високим для розглянутого діапазону частот і напруги. Однією з причин є те, що малий кут дифракції у досліджуваному гіротроні сприяє вищому відношенню вихідної потужності до омичних втрат. Зазначимо, що два перших оптимальні радіуси електронного пучка для моди  $TE_{4,3}$  становлять 0,5 мм і 0,95 мм. Дивлячись на розраховані радіуси, можна помітити, що внутрішній знаходиться близько до оптимального, але зовнішній знаходиться в досить не оптимальному положенні, що зменшує загальний структурний коефіцієнт приблизно на 30%. Це означає, що у разі оптимальних радіусів пучка пусковий струм і напруга повинні бути меншими, а вихідна потужність повинна бути вищою, ніж у досліджуваному гіротроні. У четвертому підрозділі проведено розрахунок низьковольтної МІГ для гіротрону на діапазон частот 300-400 ГГц у кодах CST PS та MDDT [41].

Таблиця 2 – Результати моделювання МІГ для двопучкового гіротрону

Напруга пучка, кВ	Анодна напруга, кВ	Пітч-фактор	Розкид, %
2,5	0,0	Зовн. 0,80	7,1
		Внутр. 0,66	5,5
2,5	+0,2	0,95	9,7
		0,97	7,5
2,5	+0,5	1,30	16,3
		1,00	11,08
3,0	0,0	1,01	10,4
		0,79	8,10
5,0	-1,0	1,42	18,3
		1,22	9,0



В результаті моделювання оптимізованої низьковольтної МІГ двопучкового гіротрону за роботи на моді  $TE_{4,3}$  ( $B = 14,3$  Т,  $I = 200$  мА) отримано енергетичні параметри двох гвинтових електронних пучків (таблиця 2).

У п'ятому підрозділі проведено дослідження формування стрічкового ГЕП з величиною пітч-фактора більше одиниці для дводзеркального МЦР з перестроюванням частоти генерації в широкому діапазоні. Оптимізацію геометрії МІГ з планарною геометрією для 75 ГГц планарного гіротрону проведено з використанням тривимірного чисельного моделювання в кодi CST PS. Результати траєкторного аналізу показали, що для формування стрічкового ГЕП кут нахилу поверхні емітера катода до ліній магнітного поля в  $18^\circ$  не є оптимальним, тому що за такого кута нахилу траєкторії електронів пучка періодично перетинаються. В процесі формування стрічкового ГЕП перетини траєкторій призводять до порушення геометрії пучка через збільшення просторового заряду та, як наслідок, до деформації пучка. В результаті траєкторного аналізу кут нахилу поверхні емітера до ліній магнітного поля склав  $45^\circ$ , що відповідає ламінарній топології. Аналіз розподілу магнітного поля соленоїда в області емітера показав, що магнітне поле по ширині емітера змінюється на кілька відсотків, що призводить до неоднорідного розподілу електронів за швидкостями й енергій по ширині пучка. Підвищення однорідності розподілу магнітного поля в області емітера в поперечному напрямку було досягнуто з використанням коригувального соленоїда прямокутної форми в області емітера планарної МІГ. В результаті моделювання отримано геометрію планарної МІГ, що формує стрічковий ГЕП з величиною пітч-фактора 1,35 у разі напруги пучка 12 кВ, струмі 1 А та компресії електронного пучка в магнітному полі близько 76 %. У шостому підрозділі проведено порівняння результатів моделювання та експериментального дослідження стрічкового ГЕП, що формується низьковольтною планарною МІГ. Оптимальну геометрію планарної МІГ для напруги пучка 5 кВ було отримано аналогічно результатам розрахунків 12 кВ планарної МІГ за допомогою коду CST PS. Ширини анода і катода планарної МІГ становлять 20 мм, ширина емітера 15 мм. Довжини: емітера – 1 мм, анода – 5 мм, катода – 4 мм, відстань між анодом і катодом 3,3 мм (рис. 11). Розрахунок геометрії 5 кВ планарної МІГ проводився для адіабатично зростаючого магнітного поля з величиною в максимумі 0,3 Т.

У розрахунках струм пучка становив 300 мА, магнітне поле в області емітера 0,1 Т, за напруги пучка 5 кВ величина пітч-фактора перевищує одиницю, в той час як розкид компонент швидкостей електронів не перевищує 15 %. У виготовленому експериментальному зразку планарної МІГ застосовано низькотемпературний оксидний емітер в формі прямокутної пластини нікелю площею  $0,15$  см<sup>2</sup>, що покрито шаром потрійного карбонату барію (Ba, Sr, Ca) CO<sub>3</sub>. Вимірювання величини пітч-фактора і розкиду швидкостей електронів в пучку проводилося методом гальмуючого потенціалу, що дозволило знайти розподіл поздовжніх швидкостей електронів, та, в силу рівності повних швидкостей електронів, знайти їх обертальні швидкості.

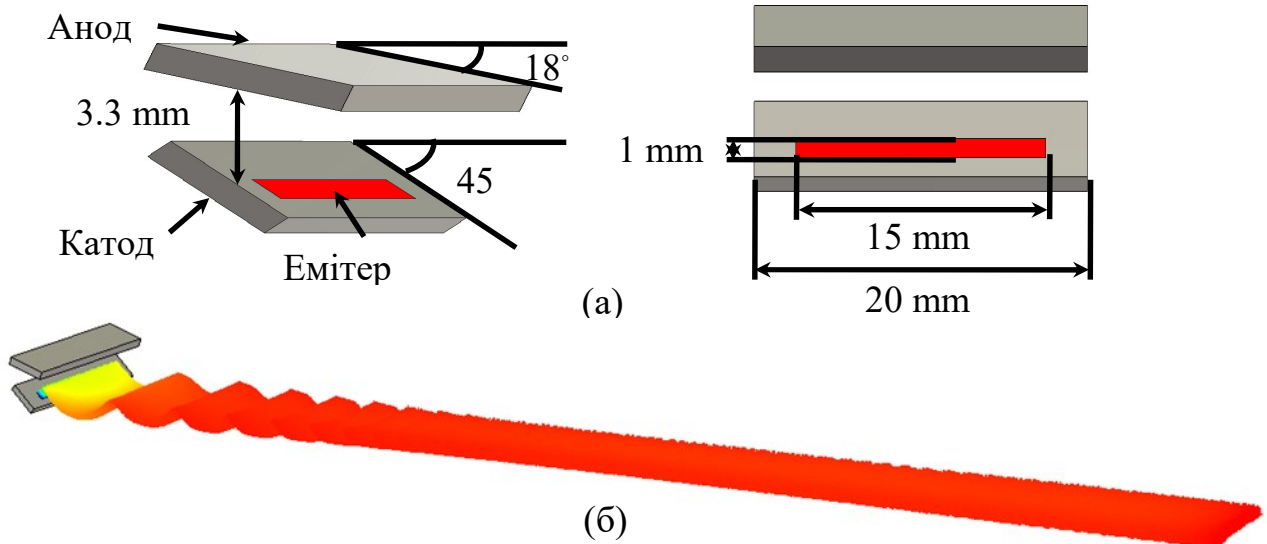


Рисунок 11 – Результати розрахунків 5 кВ планарної МІГ (а) та траєкторний аналіз руху стрічкового гвинтового електронного пучка у кодї CST PS (б)

Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними показали, що розкиди компонентів швидкостей електронів, які отримано експериментально, в середньому на 5 % перевищують значення, які отримано в ході моделювання, що обумовлено впливом електронів, відбитих від колектору під дією гальмуючого потенціалу, на пучок під час проведення експерименту. Профіль пучка досліджено за аналізом світіння екрану, що бомбардується електронами, та порівняно з результатами моделювання. У цьому підрозділі проведено моделювання збудження коливань дводзеркальних резонаторів гіротронів сформованими стрічковими ГЕП. Перевірку якості стрічкового ГЕП зі струмом 1 А, сформованого 12 кВ планарною МІГ, було проведено за допомогою комп'ютерного моделювання процесу взаємодії ГЕП з ВЧ полем планарного резонатора (рис. 12).

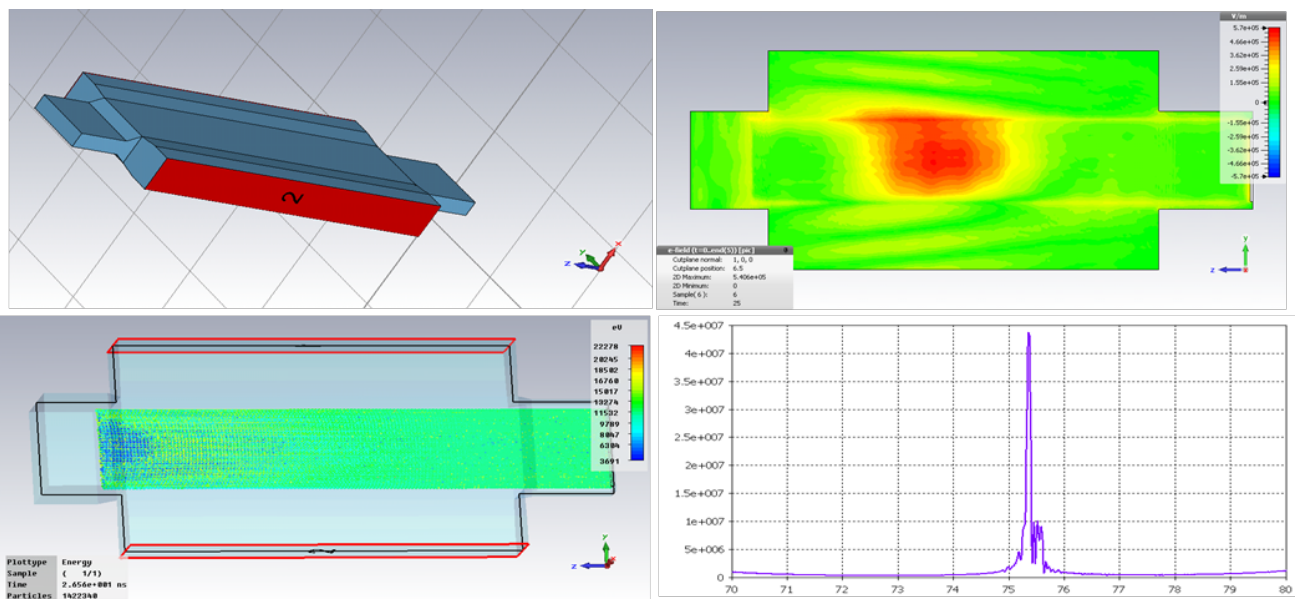


Рисунок 12 – Моделювання збудження планарного 75 ГГц гіротрону стрічковим ГЕП з напругою 12 кВ і струмом 1 А у магнітному полі 2,75 Т у кодї CST PS

В ході комп'ютерного моделювання було отримано стаціонарну генерацію на  $TE_{0,3,1}$  моді планарного хвилеводу за величини індукції магнітного поля 2,75 Т. За оптимальної довжини резонатора потужність випромінювання становила 2 кВт, що відповідає ККД  $\approx 15\%$ . Моделювання процесу взаємодії низьковольтного стрічкового ГЕП проведено з ВЧ полем короткофокусного конфокального резонатора, що складається з двох циліндричних дзеркал довжиною 26,25 мм та радіусом кривизни 6 мм. Частота робочої моди  $TE_{0,3}$  перестроювалася у діапазоні 50-95 ГГц у разі зміни відстані між дзеркалами від 5 до 10 мм.

Моделювання процесу взаємодії 5кВ стрічкового ГЕП з ВЧ полем  $TE_{0,3,1}$  моди конфокального резонатора продемонструвало генерацію на частоті 80 ГГц з ККД близько 14%.

**Розділ 6** дисертації присвячено стабілізації та контролю параметрів випромінювання електронно-вакуумних приладів із використанням зовнішніх багатоконтурних пропорційно-інтегро-диференційних (ПІД) регуляторів для практичних застосувань, зокрема, у ЯМР-ДПЯ спектроскопії. Перший підрозділ присвячено аналізу факторів, що впливають на стабільність параметрів випромінювання та на ширину спектральної лінії клинотронів та гіротронів мм та субмм діапазонів, проведено аналіз існуючих методів стабілізації. У другому підрозділі наведено результати з розробки схеми стабілізації параметрів випромінювання клинотронів мм та субмм за допомогою ПІД управління напругами, що живлять ЕОС приладів. Для реалізації алгоритму ПІД управління було розроблено компактні високовольтні джерела живлення з зовнішнім управлінням, що забезпечують перестроювання прискорювальної напруги клинотронів у діапазоні 0-8 кВ з кроком до 100 мВ та стабільністю напруги в межах 2-5 ppm. Розроблено багатоконтурну схему стабілізації параметрів випромінювання клинотронів, де стабілізація потужності випромінювання реалізовується завдяки ПІД контролю за струмом електронного пучка за допомогою управління потужністю розжарювання ЕОС, та стабілізація частоти випромінювання досягається завдяки ПІД управлінню прискорювальною напругою. У третьому підрозділі наведено результати експериментального дослідження стабільності частоти та потужності випромінювання клинотронів діапазону 130-400 ГГц для ЯМР-ДПЯ спектроскопії. У результаті вимірювань ширина спектральної лінії випромінювання 300 ГГц клинотрона з потужністю 100 мВт на рівні -3 дБ склала менше 8 МГц, в той час як в діапазоні частот від 280 до 320 ГГц ширина спектральної лінії знаходилася у діапазоні 7 ... 10 МГц. У високовольтному джерелі живлення було реалізовано схему модуляції амплітуди пульсацій прискорювальної напруги задля дослідження залежностей ширини спектральної лінії клинотронів в діапазоні пульсацій напруги 0,03-3 В. Було продемонстровано збільшення ширини спектральної лінії до 15 МГц у разі пульсацій напруги пучка 700 мВ у клинотроні на частоті 205,9 ГГц, в той час як в 300 ГГц клинотроні пульсації прискорювальної напруги на рівні 2,8 В збільшували ширину спектральної лінії випромінювання до 100 МГц. В результаті застосування ПІД схеми управління у 300 ГГц клинотроні було отримано ширину спектральної лінії близько 1 МГц із довготривалою нестабільністю частоти менше 5 МГц протягом 10 годин безперервної роботи у разі потужності випромінювання на рівні 100 мВт зі стабільністю близько 0,5 %. У четвертому підрозділі наведено

результати стабілізації вихідних характеристик гіротронів з триелектродною МІГ для ЯМР-ДПЯ спектроскопії. Розроблено багатоконтурні ПІД схеми стабілізації параметрів випромінювання гіротронів з триелектродними МІГ, в яких стабілізацію потужності випромінювання реалізовано як за рахунок управління струмом електронного пучка, так і за рахунок безінерційного управління пітч-фактором ГЕП. Завдяки залежності потужності випромінювання гіротронів не тільки від повної енергії електронів, а й від пітч-фактора, безінерційне управління анодною напругою триелектродної МІГ, що було реалізовано з використанням двоконтурного ПІД управління напругами живлення ЕОС, дозволило суттєво підвищити довгострокову стабільність параметрів випромінювання гіротронів на другій гармоніці циклотронної частоти для експериментів з підвищення чутливості ЯМР-ДПЯ спектроскопії (рис. 13).

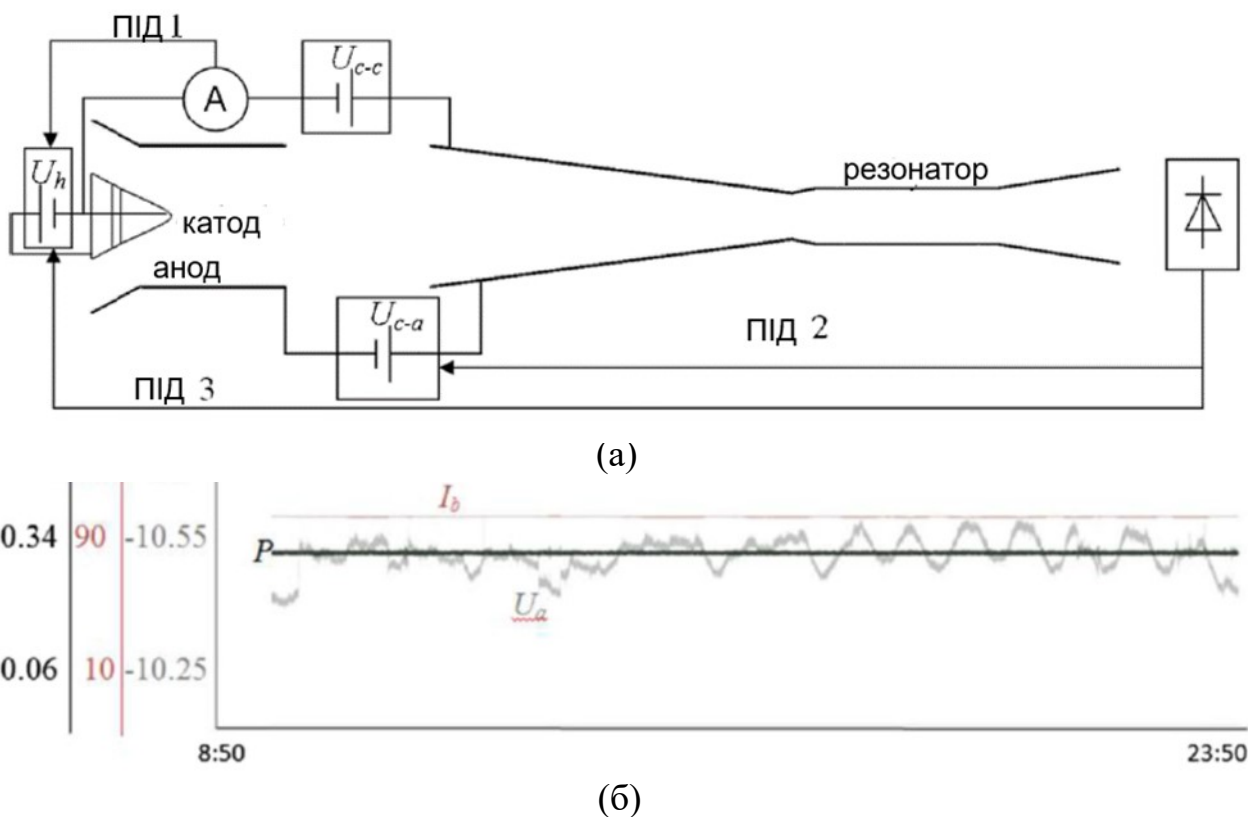


Рисунок 13 – Стабілізація параметрів випромінювання гіротронів для ЯМР-ДПЯ спектроскопії з використанням схеми багатоконтурного ПІД управління: схема ПІД управління анодною напругою триелектродної МІГ з використанням програми LabVIEW (а) та експериментальні результати стабілізації потужності випромінювання 395 ГГц гіротрону на протязі 15 годин (б)

Для оптимізації методу стабілізації параметрів випромінювання за допомогою алгоритму багатоконтурного ПІД управління напругами живлення МІГ коефіцієнти ПІД регулятора знаходилися за методом Циглера-Ніколса з подальшим корегуванням за результатами експериментальних досліджень стабільності роботи алгоритму. В результаті експериментальних досліджень було реалізовано стабілізацію параметрів випромінювання гіротронів з триелектродною МІГ за допомогою двоконтурного методу ПІД управління струмом

та пітч-фактором пучка. З часової реалізації сигналів на рис. 13 (б) видно, що відповідно до вимірювання потужності випромінювання за допомогою піроелектричного сенсора у секції направлено відгалужувача, управління анодною напругою МІГ в діапазоні 10,35-10,6 кВ дозволило отримати нестабільність потужності генерації 395 ГГц гіротрону безперервної дії менше 0,1% для ЯМР-ДПЯ спектроскопії з безперервною тривалістю експериментів більше 15 годин. В експерименті відповідно до змін потужності випромінювання управлявся струм пучка завдяки ПІД контролю напруги розжарення катода МІГ.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено ряд важливих для теорії та практики проблем, пов'язаних з підвищенням ефективності електронно-хвильової взаємодії та стабільності вихідних характеристик компактних низьковольтних електронно-вакуумних приладів з перестроюванням частоти міліметрового та субміліметрового діапазонів.

В результаті проведених досліджень було розроблено системи міліметрового та субміліметрового діапазонів на основі клинотронів та гіротронів для досліджень біологічних об'єктів за допомогою ЯМР-ДПЯ спектроскопії, для юстування квазіоптичної лінії стеларатора W7-X та для інших практичних застосувань. Результати досліджень можуть зробити істотний вплив в розробці радіолокаційних систем, систем зв'язку з підвищеною швидкістю передачі даних, систем діагностики плазми, в системах аналізу біологічних і медичних об'єктів, матеріалознавстві та багатьох інших.

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

1. У клинотронах з несиметричною електронно-оптичною системою продемонстровано вплив профілювання електронних потоків за швидкістю на ефективність електронно-хвильової взаємодії та продемонстровано підвищення ефективності взаємодії у разі профілю швидкостей електронів, що відповідає розподілу амплітуди ВЧ поля та параметру оптимального розсинхронізму вздовж гребінки.
2. Розроблено МФС з розподілом неоднорідного магнітного поля вздовж простору взаємодії клинотрона, що збільшує довжину траєкторій електронів пучка у шарі ефективного ВЧ поля, що дало можливість підвищити коефіцієнт виходу пакетованих клинотронів мм та субмм діапазонів.
3. В результаті дослідження залежності провідності матеріалу гребінки від шорсткості поверхні та від нагріву внаслідок осідання електронного пучка показано, що такі додаткові омичні втрати призводять до суттєвого зниження швидкості зростання вихідної потужності випромінювання від електронного струму в постійному клинотронному режимі на відміну від імпульсного режиму, що добре узгоджується з експериментальними результатами.
4. В результаті аналізу впливу відбиття та трансформації хвиль у надрозмірному резонаторі на вихідні характеристики клинотрона показано, що трансформація поверхневої хвилі у об'ємну призводить до резонансного характеру збудження коливальних у тому числі за істотних затухань поверхневих хвиль в

електродинамічній системі клинотрона. Встановлено та проаналізовано вплив відбиття та трансформації хвиль у надрозмірному резонаторі клинотрона на перерозподіл енергії, що поширюється у хвилеводний вивід і анодну апертуру гармати та відбивається у простір взаємодії, що регулюється поршнем в області колектору.

5. Показано існування об'ємно-поверхневих коливань в резонаторі клинотрону з багатоступеневою плоскою гребінкою, які характеризуються локалізацією поля як поблизу системи, що сповільнює рух хвиль, так і в об'ємі резонатора, та дозволяють забезпечити режими з високим спротивом зв'язку та добротністю. Експериментально отримано генерацію гібридних коливань багатоступеневої гребінки та коливань базової одноступеневої гребінки в об'ємному резонаторі з багатоступеневою плоскою гребінкою.
6. Експериментально отримано генерацію електромагнітних коливань в низьковольтному МЦР з циліндричним резонатором в слабонеоднорідному магнітному полі. Вперше отримано ефективну низьковольтну генерацію двопучкового гіротрону в діапазоні робочих частот 300-400 ГГц. Отримано генерацію з потужністю 60 Вт на частоті 400 ГГц у гіротроні з прискорювальною напругою 5,4 кВ, у той час як мінімальна напруга генерації склала 2,4 кВ, що добре узгоджується з моделюванням. За результатами моделювання показано можливість ще більшого зниження прискорювальної напруги за умови застосування компактної магнетронно-інжекторної гармати, що формує гвинтовий електронний потік з більшим пітч-фактором у діапазоні низьких напруг.
7. За допомогою чисельного моделювання вперше отримано геометрії планарних магнетронно-інжекторних гармат, що генерують стрічкові гвинтові електронні потоки з пітч-факторами більше одиниці з прискорювальною напругою 12 кВ та струмом пучка 1А, а також з напругою 5 кВ та струмом пучка 0,3А. У результаті чисельного моделювання взаємодії 12 кВ стрічкового ГЕП з ВЧ полями планарного резонатора продемонстровано генерацію з ефективністю понад 15 %, в той час як ефективність генерації 5 кВ стрічкового ГЕП з полями конфокального резонатора з двох циліндричних дзеркал у діапазоні 50-95 ГГц склала 14 %. Вперше експериментально сформовано стрічковий ГЕП з шириною 10 мм та мінімальними спотвореннями профілю пучка в області однорідного магнітного поля з пітч-фактором 1,1, розкидом обертальної компоненти швидкості електронів 10 %, повздовжньої компоненти 14 % з напругою 5 кВ та струмом пучка до 300 мА.
8. Отримано залежності ширини спектральної лінії клинотронів субмм діапазону від пульсацій прискорювальної напруги та визначено діапазон пульсацій напруги джерела живлення клинотрона, що забезпечує ширину спектральної лінії та потужність генерації, необхідні у ЯМР спектроскопії з динамічною поляризацією ядер.
9. Вперше запропоновано та реалізовано стабілізацію параметрів випромінювання гіротронів з триелектродною МІГ за допомогою двоконтурного методу ПІД управління струмом та пітч-фактором пучка, що дозволило отримати нестабільність потужності генерації менше 0,1 % у гіротронах для ЯМР-ДПЯ спектроскопії з безперервною тривалістю експериментів більше 30 годин.

## СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1\*. Y. Matsuki, T. Fujiwara, *Advances in High-Field DNP Methods, Chapter 4, Experimental Approaches of NMR Spectroscopy: Methodology and Application to Life Science and Materials Science*, Edited by the Nuclear Magnetic Resonance Society of Japan, pp.91-134, Springer, 2017.
- 2\*. M. Blank, K. L. Felch, “Millimeter-wave Sources for DNP-NMR”, *eMagRes*, vol. 7, pp. 155-166, 2018.
- 3\*. Г. Я. Левин, А. И. Бородкин, А. Я. Кириченко, С. А. Чурилова, А. Я. Усиков, *Клинотрон*. К.: Наук. Думка, 1992.
- 4\*. M. Yu. Glyavin, N. A. Zavolskiy, A. S. Sedov, G. S. Nusinovich, “Low-voltage gyrotrons”, *Physics of Plasmas*, vol. 20, pp. 667-694, 2013.
- 5\*. V. L. Bratman, A. E. Fedotov, A. P. Fokin, M. Yu. Glyavin, V. N. Manuilov, I. V. Osharin, “Operation of a sub-terahertz CW gyrotron with an extremely low voltage”, *Physics of Plasmas*, vol. 24, no. 113105, pp. 1-5, 2017.
- 6\*. И. И. Антаков, С. Н. Власов, В. А. Гинцбург, Л. И. Загрядская, Л. В. Николаев, “МЦР - генераторы с механической перестройкой частоты”, *Электроника СВЧ*, серия 1, №8, с. 20 – 25, 1975.
- 7\*. С. Н. Власов, А. Г. Лучинин, Г. С. Нусинович, И. М. Орлова, В. Г. Усов, В. А. Флягин, В. И. Хижняк, “Гиротроны с двухзеркальными резонаторами”, Сб. научных трудов «Гиротроны», Горький, с. 160 – 170, 1980.
- 8\*. S. Manzhos, K. Schuenemann, S. V. Sosnytskiy, D. M. Vavriv, “Clinotron: a Promising Source for THz Regions”, *Радиофизика и радиоастрономия*, т. 5, № 3, с. 265-273, 2000.
- 9\*. Е. Е. Лысенко, О. Ф. Пишко, С. А. Чурилова, “Экспериментальное исследование клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии”, *Радиофизика и радиоастрономия*, т. 4, № 1, с. 13–19, 1999.
- 10\*. G. S. Nusinovich, *Introduction to the Physics of Gyrotrons*. Baltimore: John Hopkins University Press, 2004.
- 11\*. А. В. Гапонов, М. И. Петелин, В. К. Юлпатов, “Индуцированное излучение возбужденных классических осцилляторов и его использование в высокочастотной электронике”, *Известия ВУЗов. Радиофизика*, т. 10, № 9, с. 1414–1453, 1967.
- 12\*. N. S. Ginzburg, I. V. Zotova, A. S. Sergeev, V. Yu. Zaslavsky, I. V. Zheleznov, “High-Power Terahertz-Range Planar Gyrotrons with Transverse Energy Extraction”, *Physical Review Letters*, vol. 108, no. 105101, pp. 1-4, 2012.
- 13\*. S. O. Steshenko, “Generalization of the mode-matching technique to the problems of scattering by semi-infinite slow-wave structures”, *Радиофизика и электроника*, Т. 25, № 4, с. 10 – 17, 2020.
- 14\*. В. Б. Штейншлейгер, *Явления взаимодействия волн в электромагнитных резонаторах*. М.: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1955.
- 15\*. J. Schneider, “Stimulated emission of radiation by relativistic electrons in a magnetic field”, *Physical Review Letters*, vol. 2, pp. 504-505, 1959.
- 16\*. Sh. E. Tsimring, *Electron beams and microwave vacuum electronics*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.



- 17\*. V. E. Zapevalov, S. E. Tsimring, “Multibeam gyrotrons”, *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 33, no. 11, pp. 954-960, 1990.
- 18\*. N. S. Ginzburg, M. Yu. Glyavin, A. M. Malkin, V. N. Manuilov, R. M. Rozental, A. S. Sedov, A. S. Sergeev, V. Yu. Zaslavsky, I. V. Zotova, T. Idehara, “Improvement of Stability of High Cyclotron Harmonic Operation in the Double-Beam THz Gyrotrons”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 44, no. 8, pp. 1303-1309, 2016.
- 19\*. 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”, *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, vol. 36, no. 10, pp. 1164-1175, 2015.

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Б. П. Ефимов, А. Н. Кулешов, С. А. Кишко, С. С. Пономаренко, Э. М. Хуторян, “Возбуждение мазера на циклотронном резонансе при низких ускоряющих напряжениях”, Вестник ХНУ имени В.Н. Каразина. Серия «Радиофизика и электроника», Т. 17, № 942, с.81–86, 2010.
2. Б. П. Ефимов, А. Н. Кулешов, С. С. Пономаренко, “Возбуждение переходного излучения в миллиметровом диапазоне электронными сгустками, падающими на проволочный экран”, Радиофизика и электроника, Т. 2, № 16, с. 71 – 76, 2011.
3. С. С. Пономаренко, С. А. Кишко, А. Н. Кулешов, Э. М. Хуторян, В. В. Завертанный, Л. А. Кириченко, А. С. Тищенко, Б. П. Ефимов, “Транспортировка нерелятивистских электронных потоков в слабо неоднородных магнитных фокусирующих полях для клинотронов субмиллиметрового диапазона”, Вестник ХНУ имени В.Н. Каразина. Серия «Радиофизика и электроника», Т. 21, № 1038, с.77–82, 2012.
4. В. В. Завертанный, С. С. Пономаренко, С. А. Кишко, Б. П. Ефимов, А. Ф. Забродский, Л. А. Кириченко, Т. В. Кудинова, А. Н. Кулешов, “Магнитная фокусирующая система интенсивных электронных пучков для клинотронов субмиллиметрового диапазона”, Изв. ВУЗов. Прикладная и нелинейная динамика, Т. 20, № 5, с. 112–120, 2012.
5. S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, E. M. Khutoryan, A. N. Kuleshov, V. V. Zavertanniy, I. V. Lopatin, B. P. Yefimov, “400 GHz Continuous-Wave Clinotron Oscillator”, IEEE Trans. on Plasma Science, vol. 41, № 1, pp.82–86, 2013.
6. А. Н. Кулешов, “Стабилизация мощности излучения вакуумных электронных приборов субмиллиметрового диапазона”, Вестник ХНУ имени В. Н. Каразина. Серия «Радиофизика и электроника», Т. 22, № 1067, с.43–47, 2013.
7. С. А. Кишко, А. Н. Кулешов, Б. П. Ефимов, “Возбуждение колебаний конфокального резонатора низковольтным ленточным винтовым электронным пучком в миллиметровом диапазоне”, Вестник ХНУ имени В. Н. Каразина. Серия «Радиофизика и электроника», Т. 23, № 1094, с.14–19, 2013.



8. Э. М. Хуторян, С. С. Пономаренко, С. А. Кишко, А. Н. Кулешов, К. А. Лукин, “Колебания в генераторе О-типа при возбуждении объемно-поверхностной моды резонатора с периодически неоднородной гребенкой”, Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика, Т. 21, № 2, с. 9–19, 2013.
9. S. A. Kishko, S. S. Ponomarenko, A. N. Kuleshov, V. V. Zavertanniy, B. P. Yefimov, I. Alexeff, “Low-Voltage Cyclotron Resonance Maser”, IEEE Trans. on Plasma Science, vol. 41, № 9, pp.2475–2479, 2013.
10. А. Н. Кулешов, “Разработка компактных источников электромагнитного излучения средней мощности миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов”, Радиопизика и Электроника, Т. 4, № 4, с. 73–79, 2013.
11. S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, E. M. Khutoryan, B. P. Yefimov, A. N. Kuleshov, “Development of 94 GHz BWO – klynotron with 3-stage grating”, Telecommunications and Radio Engineering, vol. 73, № 3, pp.271–281, 2014.
12. S. A. Kishko, A. N. Kuleshov, M. Yu. Glyavin, I. V. Zotova, I. V. Zheleznov, N. S. Ginzburg, V. N. Manuilov, V. Yu. Zaslavskii, “Development of the 75 GHz planar gyrotron with transverse energy extraction”, Journal of Communications Technology and Electronics, vol. 59, № 7, pp.777–781, 2014.
13. T. Idehara, A. N. Kuleshov, K. Ueda, E. M. Khutoryan, “Power Stabilization of High-Frequency Gyrotrons Using a Double PID Feedback Control for Applications to High Power THz Spectroscopy”, Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, vol. 35, № 2, pp.159–168, 2014.
14. E. M. Khutoryan, T. Idehara, A. N. Kuleshov, K. Ueda, “Gyrotron Output Power Stabilization by PID Feedback Control of Heater Current and Anode Voltage”, Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, vol. 35, № 12, pp.1018–1029, 2014.
15. Yu. S. Kovshov, S. V. Starokozhev, S. A. Kishko, S. S. Ponomarenko, S. A. Vlasenko, A. N. Kuleshov, B. P. Yefimov, “Transportation of low-voltage sheet helical electron beam for confocal gyrotron with pulsed magnetic system”, Journal of Nano- and Electronic Physics, vol. 7, № 3, pp.1–7, 2015.
16. Ю. С. Ковшов, С. А. Кишко, С. С. Пономаренко, С. А. Власенко, Ю. С. Новикова-Коротун, В. В. Завертанный, А. Н. Кулешов, “Моделирование и экспериментальное исследование характеристик клинотронов непрерывного действия в диапазоне частот 125... 135 ГГц”, Радиопизика и Электроника, Т. 7, № 2, с. 45–52, 2016.
17. Ю. С. Ковшов, С. С. Пономаренко, С. А. Кишко, А. А. Лихачов, С. А. Власенко, В. В. Завертанный, Э. М. Хуторян, А. Н. Кулешов, “Высокочастотные омические потери в клинотронах непрерывного действия терагерцевого диапазона частот”, Радиопизика и Электроника, Т. 8, № 1, с. 68–76, 2017.
18. 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, 88, 094708, pp. 1-5, 2017.
19. E. M. Khutoryan, Yu. S. Kovshov, A. A. Likhachev, S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, K. A. Lukin, V. V. Zavertanniy, T. V. Kudinova, S. A. Vlasenko,

- A. N. Kuleshov, T. Idehara, “Excitation of hybrid space-surface waves in clinotrons with non-uniform grating”, *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, vol. 39, № 3, pp.236–249, 2018.
20. Yu. S. Kovshov, S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, E. M. Khutoryan, A. N. Kuleshov, “Numerical simulation and experimental study of sub-THz and THz CW clinotron oscillators”, *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 65, № 6, pp.2177–2182, 2018.
  21. Yu. S. Kovshov, S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, A. A. Likhachev, A. A. Danik, L. P. Mospan, S. A. Steshenko, E. M. Khutoryan, A. N. Kuleshov, “Effect of Mode Transformation in THz Clinotron”, *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, vol. 39, № 11, pp.1055–1064, 2018.
  22. A. Kuleshov, Y. Ishikawa, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, T. Idehara, E. Khutoryan, S. Kishko, S. Ponomarenko, M. Glyavin, I. Bandurkin, V. Manuilov, A. Fedotov, T. Saito, “Low-Voltage Operation of the Double-Beam Gyrotron at 400 GHz”, *IEEE Trans. on Electron Devices*, vol. 67, № 2, pp.673–676, 2020.
  23. С. С. Пономаренко, А. Н. Кулешов, В. В. Завертанный, С. А. Кишко, Компактная магнитная фокусирующая система для клинотрона субмиллиметрового диапазона / XV международная зимняя школа-семинар по электронике СВЧ и радиофизике: 6-11 фев. 2012 г.: материалы школы-семинара. – Саратов, 2012. – С. 69.
  24. S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, E. M. Khutoryan, A. N. Kuleshov, A. S. Tishchenko, B. P. Yefimov, Development of CW Clinotron Oscillator at 400 GHz / *Mathematical Methods in Electromagnetic Theory: Int. Conf.*, 28 – 30 Aug. 2012: Conf. Proc. – Kharkiv, 2012. – P. 348 – 352.
  25. S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, E. M. Khutoryan, A. N. Kuleshov, B. P. Yefimov, Hybrid mode of surface-volume waves in BWO with nonuniform grating / *Physics and engineering of microwaves: Int. Symp.*, 23-28 June 2013: Symp. Proc. – Kharkiv, 2013. – P. 391 – 393.
  26. S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, E. M. Khutoryan, A. N. Kuleshov, B. P. Yefimov, On Ohmic Losses Decrease in THz BWO-Clinotron Oscillators / *Infrared, Millimeter and Terahertz Waves: Int. Conf.*, 1 – 6 Sep. 2013: Conf. Proc. – Mainz on the Rhine, 2013. – P. 33 – 34.
  27. S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, E. M. Khutoryan, A. N. Kuleshov, B. P. Yefimov, Millimeter wave BWO-oscillator with multistage grating / *Antenna Theory and Techniques: Int. Conf.*, 16 – 20 Sep. 2013: Conf. Proc. – Odessa, 2013. – P. 515-517.
  28. A. N. Kuleshov, S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, V. V. Zavertanniy, E. M. Khutoryan, B. P. Yefimov, Sub-THz CW Clinotron Oscillators with Increased Output Power / *IEEE International Vacuum Electronics Conference: Int. Conf.*, 22 – 24 Apr. 2014: Conf. Proc. – Monterey, 2014. – P. 73-74.
  29. S. Kishko, I. Alexeff, B. Yefimov, S. Ponomarenko, A. Kuleshov, Negative mass instability in Low Voltage Maser on Cyclotron Resonance / *Mathematical Methods in Electromagnetic Theory: 14 Int. Conf.*, 28 – 30 Aug. 2012: Conf. Proc. – Kharkiv, 2012. – P. 344 – 347.
  30. S. Kishko, N. Ginzburg, M. Glyavin, V. Zaslavsky, I. Zotova, A. Sergeev, A. Kuleshov, Modeling and development of tunable gyrotron with a planar

- electron beam / Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2012): 22nd Int. Conf., 10-14 Sept. 2012: Conf. Proc. – Sevastopol, 2012. – P. 781 – 782.
31. S. A. Kishko, S. S. Ponomarenko, A. N. Kuleshov, B. P. Yefimov, M. Yu. Glyavin, I. V. Zotova, I. V. Zheleznov, N. S. Ginzburg, V. N. Manuilov, V. Yu. Zaslavsky, Optimization of a magnetron-injection gun for a planar gyrotron / Symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves and workshop on terahertz technology: Int. Conf., 23-28 Jun. 2013: Conf. Proc. – Kharkiv, 2013. – P. 388 – 390.
  32. S. A. Kishko, S. S. Ponomarenko, A. N. Kuleshov, B. P. Yefimov, M. Yu. Glyavin, I. V. Zotova, I. V. Zheleznov, N. S. Ginzburg, V. N. Manuilov, V. Yu. Zaslavsky, Low-Voltage Planar Cyclotron Resonance Maser Based on a Confocal Cavity/ Infrared, Millimeter and Terahertz Waves IRMMW-THz: Int. Conf., 1 – 6 Sept. 2013: Conf. Proc. – Mainz on the Rhine, 2013. – P. 1 – 2.
  33. S. A. Kishko, S. S. Ponomarenko, A. N. Kuleshov, B. P. Yefimov, Development of the planar low-voltage cyclotron resonance maser with a sheet helical electron beam / Antenna Theory and Techniques: Int. Conf., 16-20 Sept. 2013: Conf. Proc. – Odessa, 2013. – P. 220 – 222.
  34. S. A. Kishko, S. S. Ponomarenko, A. N. Kuleshov, B. P. Yefimov, Planar Magnetron-Injection Gun for Low-Voltage Quasi-Optical Gyrotron / IEEE International Vacuum Electronics Conference: Int. Conf., 22-24 Apr. 2014: Conf. Proc. – Monterey, 2014. – P. 439 – 440.
  35. S. S. Ponomarenko, Yu. S. Kovshov, S. A. Kishko, Yu. S. Novikova-Korotun, E. M. Khutoryan, A. N. Kuleshov, Development of compact CW clinotrons for DNP-NMR spectroscopy / 9th Int. Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW). – 2016. – P. 1-4, DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538043.
  36. S. A. Kishko, S. S. Ponomarenko, Yu. S. Kovshov, A. N. Kuleshov, Waveguide output for 130 GHz CW clinotron / 9th Int. Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW). – 2016. – P. 1-3, DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538044.
  37. S. Ponomarenko, Yu. Kovshov, S. Kishko, A. Kuleshov, Numerical simulation and experimental study of 130 GHz CW clinotron oscillator / IEEE International Vacuum Electronics Conference: Int. Conf. – 19 – 21 Apr. 2016: Conf. Proc. – Monterey. – P. 1-2.
  38. Yu. Kovshov, S. Ponomarenko, S. Kishko, A. Likhachev, A. Danik, L. Mospan, S. Steshenko, E. Khutoryan, A. Kuleshov, Demonstration of a mode transformation effect in 300-GHz CW clinotron / 2018 Int. Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET). – Kyiv, Ukraine. – Jul. 2-5, 2018. – P. 254 - 257, DOI: 10.1109/MMET.2018.8460346.
  39. Yu. Kovshov, S. Ponomarenko, S. Kishko, A. Likhachev, A. Danik, V. Zheltov, E. Khutoryan, D. Zahrevskiy, A. Kuleshov, Electron beam velocity spread effect on a clinotron operation / 2018 Int. Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET). – Kyiv, Ukraine. – Jul. 2-5, 2018. – P. 326 - 329, DOI: 10.1109/MMET.2018.8460245.
  40. Yu. Kovshov, S. Ponomarenko, S. Kishko, A. Likhachev, A. Danik, E. Khutoryan, D. Zahrevskiy, A. Kuleshov, Tracking analysis of a sheet electron beam for

clinotron tube / 2018 Int. Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET). – Kyiv, Ukraine. – Jul. 2-5, 2018. – P. 330 - 333, DOI: 10.1109/MMET.2018.8460387.

41. A. Likhachev, S. Kishko, S. Ponomarenko, E. Khutoryan, A. Kuleshov, M. Glyavin, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, T. Idehara, Low-Voltage Adiabatic Magnetron Injection Gun for 400 GHz Gyrotron / 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW 2020). – Kharkiv, Ukraine. – Sept. 21-25, 2020. – P. 950 - 953, DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252629.
42. A. Likhachev, S. Ponomarenko, S. Kishko, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, M. Tani, 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 2020). – Kharkiv, Ukraine. – Sept. 21-25, 2020. – P. 942 - 945, DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252641.

## АНОТАЦІЯ

**Кулешов О. М. Нові режими автоколивань у низьковольтних електронно-вакуумних приладах міліметрового та субміліметрового діапазонів із перестроюванням частоти.** – На правах рукопису.

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, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-прикладної проблеми підвищення ефективності взаємодії нерелятивістських електронних пучків із поверхневими, об'ємними, а також гібридними електромагнітними хвилями у надрозмірних електродинамічних структурах із метою розробки компактних широкосмугових низьковольтних електронно-вакуумних приладів (ЕВП) міліметрового та субміліметрового діапазонів. Розглядаються два класи приладів, які мають середні рівні потужності у широкому діапазоні частот у мм та субмм діапазонах: клинотрони та мазери на циклотронному резонансі. В клинотронах, які є різновидом ЕВП на ефекті Вавілова-Черенкова, що були винайдені та отримали широкий розвиток у ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України, в основі принципу дії лежить взаємодія стрічкового електронного потоку, що транспортується під малим кутом до поверхні системи, що сповільнює рух хвилі, типу гребінка у хвилеводі, та поверхневими електромагнітними хвилями, що збуджуються. В основі принципу дії приладів типу мазерів на циклотронному резонансі є взаємодія гвинтових електронних потоків з об'ємними  $TE_{m,n,q}$  модами відкритих резонансних систем.

**Ключові слова:** ТГц клинотрон, низьковольтний мазер на циклотронному резонансі, електронно-хвильова взаємодія, гібридні об'ємно-поверхневі хвилі, трансформація коливань, стрічкові гвинтові електронні пучки, зовнішні багатоконтурні пропорційно-інтегрально-диференційні регулятори.

## АННОТАЦИЯ

**Кулешов А. Н. Новые режимы автоколебаний в низковольтных электронно-вакуумных приборах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с перестройкой частоты.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника. – Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 2021.

Диссертационная работа посвящена решению важной научно-прикладной проблемы повышения эффективности взаимодействия нерелятивистских электронных пучков с поверхностными, объемными, а также гибридными электромагнитными волнами в сверхразмерных электродинамических структурах с целью разработки компактных широкополосных низковольтных электронно-вакуумных приборов (ЭВП) миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Рассматриваются два класса устройств, которые обладают средними уровнями мощности и широким диапазоном перестройки частоты в мм и субмм диапазонах: клинотроны и мазеры на циклотронном резонансе. В клинотронах, являющихся разновидностью ЭВП на эффекте Вавилова-Черенкова, которые были изобретены и получили широкое развитие в ИРЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины, в основе принципа действия лежит взаимодействие ленточного электронного потока, транспортируемого под малым углом к поверхности замедляющей системы типа гребенка в волноводе, и возбуждаемыми поверхностными электромагнитными волнами. В основе принципа действия приборов типа мазеров на циклотронном резонансе лежит взаимодействие винтовых электронных потоков с объемными  $TE_{m,n,q}$  модами открытых резонансных систем.

**Ключевые слова:** ТГц клинотрон, низковольтный мазер на циклотронном резонансе, электронно-волновое взаимодействие, гибридные объемно-поверхностные волны, трансформация колебаний, ленточные поливинтовые электронные пучки, внешние многоконтурные пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы.

## ABSTRACT

Kuleshov O. M. New regimes of autooscillations in low-voltage frequency-tunable vacuum electron devices of mm and submm ranges. – As a manuscript.

Thesis for scientific degree of doctor of science in physics and mathematics on speciality 01.04.04 – physical electronics. – O. Ya. Usikov institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation work is devoted to the solution of an important scientific and applied problem of increasing the efficiency of interaction of nonrelativistic electron beams with surface, space and hybrid electromagnetic waves in oversized electrodynamic structures in order to develop compact broadband low-voltage vacuum electron devices in millimeter and submillimeter ranges. Two classes of devices with medium output power levels and a wide frequency tuning range in the mm and submm bands are considered: clinotrons and cyclotron resonance masers. In clinotrons, a powerful type of vacuum electron devices on Vavilov-Cherenkov effect invented and

widely developed in the O. Ya. Usikov IRE NAS of Ukraine, the principle of operation is based on the interaction of the ribbon electron beam, which is transported at a small angle to the surface of the slow-wave system in the form of a comb in a waveguide, and excited surface electromagnetic wave. The principle of operation of cyclotron resonance masers (CRM) is based on the interaction of helical electron beams with  $TE_{m, n, q}$  modes of the open resonant systems.

**Keywords:** THz clinotron tube, low-voltage cyclotron resonance maser, beam-wave interaction, hybrid space-surface waves, mode transformation, ribbon helical electron beam, double proportional-integral-differential feedback.