

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

КОВШОВ ЮРІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.385.6

**ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРОННИХ ПОТОКІВ З ПОЛЯМИ  
ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ТГц КЛІНОТРОНІВ ПІДВИЩЕНОЇ  
СТАБІЛЬНОСТІ**

01.04.04 – фізична електроніка

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
фізико-математичних наук

Харків – 2019

Дисертація на правах рукопису

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

**Науковий керівник:** кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник

**Кулешов Олексій Миколайович**

Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова  
НАН України (м. Харків),

заступник завідувача відділу вакуумної електроніки

**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, 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 « 5 » грудня 2019 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 за адресою: 61085, м. Харків, вул. Ак. Проскури, 12, в залі засідань.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Ак. Проскури, 12.

Автореферат розісланий « 23 » жовтня 2019 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

І. В. Іванченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Останнім часом випромінювання ТГц діапазону набуває великого попиту внаслідок розвинення нових напрямків науки та техніки, таких як ТГц-бачення, системи догляду та безпеки, контроль якості продуктів харчування, ТГц-томографія, спектроскопія різноманітних середовищ та інші. Так, наприклад, у спектроскопії, заснованій на ядерному магнітному резонансі (ЯМР), щоб отримати підсилення сигналу ЯМР, використовують динамічну поляризацію ядер (ДПЯ) ТГц випромінюванням в частотному діапазоні 0,14 – 0,6 ТГц з потужністю 0,1 – 10 Вт. З огляду на тривалий час проведення експериментів таким генераторам ставиться вимога стабільності частоти випромінювання на довгостроковому інтервалі часу не гірше ніж 10 % від частоти ЯМР сигналу.

Найбільш поширені джерела ТГц випромінювання засновані на принципі перетворення кінетичної енергії електронів в енергію високочастотного електромагнітного поля за допомогою різноманітних електродинамічних систем. Це такі прилади, як клістроли з розподіленою взаємодією, лампи зворотної хвилі (ЛЗХ), клінотрони, генератори дифракційного випромінювання (ГДВ), мазери на циклотронному резонансі (МЦР) та інші. Широкого розповсюдження для великої кількості застосувань набули МЦР, які для отримання ТГц випромінювання використовують перетворення енергії оберտального руху електронів в енергію електромагнітної хвилі, здатні одержувати ТГц випромінювання великої потужності порядку сотень Вт зі зміною частоти в інтервалі до 2 % від робочої частоти, а також прилади, які засновані на індукованому випромінюванні Вавілова-Черенкова (ЛЗХ) та їх модифікації, які залежно від електродинамічної системи можуть випромінювати в широкому частотному спектрі майже до 70 % від робочої частоти з вихідною потужністю до 0,005 Вт на частоті 700 ГГц.

Використання приборів типу ЛЗХ у спектрометрах ЯМР в умовах ДПЯ вельми перспективне, зважаючи на їхні компактність та здатність випромінювати в широкому діапазоні частот за рахунок електронної перебудови частоти. Проте з просуванням у субміліметровий (СУБММ) діапазон помітною мірою зменшується потужність випромінювання, яка генерується ЛЗХ. Це зумовлено зменшенням локалізації високочастотного поля поблизу системи, що сповільнює рух хвилі (СС), та зменшенням скін-шару в металі, з якого виготовлена СС, що призводить до росту омичних високочастотних втрат. Вплив цих факторів намагаються компенсувати застосуванням інтенсивних електронних пучків (ЕП) та сильних магнітних полів, що фокусують. Іншим методом поліпшення робочих характеристик ЛЗХ генераторів з відомих сьогодні є ефект підвищення рівня вихідної потужності за рахунок використання ЕП, які поширюються під кутом до СС (клінотронний ефект). Та в ТГц діапазоні існуючі конструкції клінотронів є надрозмірними, що призводить до існування вищих типів коливань та неефективності використання хвилевідного виходу. Нарешті, для забезпечення коректних

експериментів по ЯМР в умовах ДПЯ необхідна довгострокова стабільність частоти та потужності випромінювання, для чого використовуються зовнішні контури зворотного зв'язку, наприклад, фазове автопідстроювання частоти (ФАПЧ).

З наведеного вище огляду методів поліпшення робочих характеристик ЛЗХ-генераторів О-типу впливає, що для зниження впливу ВЧ омичних втрат в ТГц діапазоні частот перспективним є використання властивостей власних об'ємних коливань високочастотного резонатора, навантаженого СС. Крім того, в результаті сумірності амплітуди пульсацій ЕП та товщини ефективного шару ВЧ поля поблизу СС необхідні подальші дослідження фізичних процесів, що відбуваються при транспортуванні інтенсивних ЕП в просторі взаємодії генератора, з метою оптимізації процесів обміну енергією між ЕП і синхронною гармонікою ВЧ поля. Також необхідним є дослідження спектральних характеристик ТГц клінотронів та розробка зовнішніх контурів зворотного зв'язку для стабілізації частоти та потужності випромінювання.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дана робота виконана у відділі вакуумної електроніки ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України в межах держбюджетних науково-дослідних робіт: “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”, державний реєстраційний номер 0111U010480); “Генерація, посилення, детектування та розповсюдження терагерцевого випромінювання; електродинамічне моделювання та експеримент” (шифр “Старт-4”, державний реєстраційний номер 0117U004034); “Розробка та впровадження нових методів обчислювальної радіофізики; теоретичне та експериментальне дослідження трансформації електромагнітних полів гіга-, терагерцевого та оптичного діапазонів в об'єктах і середовищах антропогенного та природного походження; аналіз та синтез нових вузлів і пристроїв резонансної квазіоптики, твердотільної електроніки, імпульсної та антенної техніки; розробка і тестування нових вимірювальних схем рефлекто- і діелектрометрії” (шифр “Буксир-4”, державний реєстраційний номер 0112U000210); “Теоретичне та експериментальне дослідження взаємодії електромагнітних хвиль гіга-, терагерцевого та оптичного діапазонів у природних та штучних структурах з метою розробки перспективних функціональних пристроїв антенної техніки, квазіоптики, мікрохвильової електроніки та нових радіофізичних технологій у біології та медицині” (шифр “Буксир-5”, державний реєстраційний номер 0117U004033); “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 “Сенсоріка-2”, державний реєстраційний номер 0118U003035), а також в межах госпдоговірних робіт: за замовленням компанії з обмеженою відповідальністю з імпорту та експорту

культурних і спортивних виробів "Тьян Мін" м. Уху, КНР, № WHTM2016UK0406 "Потужний НВЧ модуль на основі вакуумного генератора електромагнітних коливань типу Клінотрон «КН-0,88 (340ГГц)»" (шифр "Ветка"); за замовленням компанії з обмеженою відповідальністю з імпорту та експорту культурних і спортивних виробів "Тьян Мін" м. Уху, КНР, № 2012DOCX/S901012UR "Дослідження і спільна розробка конструкції та технології виготовлення вакуумного генератора електромагнітних коливань типу Клінотрон «КН-1,15 (260±2 ГГц)»" (шифр "Росток"); за замовленням компанії Terasense Group, Inc. м. Сан-Хосе, США, № EX.IRE.11/2015 "Розробка експериментального зразка вакуумного генератора електромагнітних коливань типу Клінотрон «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.** Метою даної дисертаційної роботи є виявлення фізичних особливостей взаємодії нерелятивістського стрічкового ЕП з електромагнітними хвилями, що збуджуються у об'ємних резонаторах з гребінчастими СС, які впливають на стабільність частоти і потужності випромінювання ТГц кліноотронів. Для досягнення цієї мети були розглянуті наступні наукові завдання:

1. Дослідження впливу омичних втрат, викликаних шорсткістю поверхні гребінчастих СС та температурним навантаженням на елементи СС, на ефективність взаємодії ЕП з електромагнітними хвилями у електродинамічних системах ТГц кліноотронів.

2. Розробка та експериментальне дослідження характеристик кліноотронів з однорідною та багатоступеневою плоскою гребінкою задля зменшення омичних втрат в ТГц кліноотронах. Порівняння експериментальних результатів з розрахунками.

3. Розвиток математичної моделі ТГц кліноотронів з урахуванням відбиття та трансформації хвиль на кінцях СС, проведення чисельного моделювання процесу електронно-хвильової взаємодії та порівняння результатів моделювання з експериментальними результатами для кліноотронів діапазону 300-340 ГГц.

4. Проведення траєкторного аналізу руху електронів стрічкового пучка в магнітних полях, що фокусують, з метою дослідження впливу розкиду повздовжніх швидкостей електронів по товщині ЕП на електронно-хвильову взаємодію в ТГц кліноотронах.

5. Дослідження факторів, які впливають на стабільність частоти та потужність випромінювання, а також на спектральні характеристики кліноотронів; розробка зовнішніх кіл стабілізації параметрів випромінювання ТГц кліноотронів.

6. Розробка та створення джерела живлення напруги, що прискорює, та зовнішнього контуру зворотного зв'язку з використанням пропорційно-інтегрально-диференціальної (ПІД) схеми управління для стабілізації частоти

та потужності випромінювання, а також для поліпшення спектральних характеристик ТГц клінотронів.

*Об'єктом дослідження* є процеси транспортування інтенсивних багатошарових ЕП, а також процеси їх взаємодії з електромагнітними хвилями в ТГц клінотронах.

*Предметом досліджень* є нерелятивістський стрічковий ЕП, що транспортується в електродинамічній системі ТГц клінотрона, а також електромагнітне поле, яке збуджується багатошаровим ЕП, що рухається уздовж СС з урахуванням омичних втрат, відбиття та трансформації хвиль на кінцях СС.

**Методи дослідження.** Врахування впливу шорсткості поверхонь СС та їх температури, що змінюється внаслідок розсіювання ЕП в клінотронному режимі, на величину високочастотних омичних втрат виконано в межах моделі Хаммерштеда-Беккадаля, закону Відемана-Франца та за допомогою визначення потужності питомих втрат поверхневої хвилі. Дослідження шорсткості поверхонь СС в клінотронах проведено методами оптичної мікроскопії. Визначення температурного розподілу в СС виконано в результаті чисельного розв'язування рівнянь теплопровідності у двовимірному та тривимірному наближенні із застосуванням ізотермічних та адіабатичних граничних умов та умови безперервності теплового потоку. Траєкторний аналіз ЕП в клінотронах ТГц діапазону виконано методами чисельного розв'язання рівнянь Пуассона та руху заряджених частинок, у тому числі з врахуванням поля просторового заряду ЕП. Взаємодія електронного потоку з ВЧ полем розглядається при спільному розв'язанні рівняння збудження коливань в ЛЗХ з похилим електронним потоком і тривимірних рівнянь руху електронного потоку, сфокусованого однорідним магнітним полем кінцевої величини. Рівняння розв'язуються методом кінцевих різниць з використанням методу крупних часток. Розрахунок матриці розсіювання на кінцях СС у електродинамічній системі клінотрона проводиться методом узагальнених матриць розсіювання. Верифікація отриманих результатів проводиться експериментально та шляхом тривимірного чисельного моделювання із використанням пакету програм CST Studio Suite.

**Наукова новизна одержаних результатів** визначається тим, що:

1. Вперше продемонстровано вплив розкиду поздовжніх швидкостей електронних шарів товстого пучка на ефективність електронно-хвильової взаємодії в клінотронах ТГц діапазону у разі використання несиметричної електронно-оптичної системи, що формує стрічковий електронний потік. Показано, що внаслідок просторового розподілу шарів електронного пучка вихідна потужність у разі швидких нижніх шарів зростає у порівнянні з одношвидкісним потоком, тоді як у протилежному разі вихідна потужність різко падає.

2. Вперше отримано умови збудження багаточастотного режиму генерації в клінотроні у разі використання несиметричної електронно-оптичної системи з розкидом поздовжніх швидкостей електронних шарів товстого пучка.

3. Вперше за допомогою розробленої моделі кліноотрона з урахуванням відбиття і трансформації поверхневих повільних хвиль у швидкі об'ємні хвилі на кінцях СС виявлено резонансний характер збуджених коливань навіть за наявності суттєвих затухань поверхневих хвиль в ТГц діапазоні. Вперше встановлено вплив умов відбиття та трансформації хвиль в області колектора на перерозподіл енергії, що потрапляє у вихідний хвилевід, що проходить крізь анодну апертуру в область електронної гармати, та енергії, що відбивається у напрямку системи, що сповільнює рух хвилі.

4. Отримала подальшого розвитку теоретична модель кліноотрона, що враховує втрати енергії поверхневої хвилі, що викликані шорсткістю поверхні СС, а також тепловим навантаженням у разі осідання електронного пучка на елементи СС. Вперше показано, що за рахунок зменшення провідності СС в постійному кліноотронному режимі залежність вихідної потужності від електронного струму більш полога, ніж в імпульсному режимі. Результати розрахункової вихідної потужності кліноотронів ТГц діапазону добре узгоджуються з експериментальними результатами.

5. Вперше за допомогою запропонованого зовнішнього контуру зворотного зв'язку з використанням пропорційно-інтегрально-диференційної схеми управління напругою живлення ТГц кліноотрона отримано параметри стабілізації робочої частоти і потужності випромінювання, що відповідають вимогам спектроскопії ЯМР з ДПЯ. Вперше отримано залежності ширини спектральної лінії ТГц кліноотронів від пульсацій напруги, що прискорює, та від щільності струму стрічкового електронного пучка. Визначено допустимий рівень таких пульсацій напруги, для забезпечення ширини спектральної лінії, необхідної для ЯМР ДПЯ спектроскопії.

**Практичне значення одержаних результатів** визначається тим, що отримані в процесі виконання дисертаційної роботи результати можуть бути використані при розробці ТГц комплексів на основі кліноотронів з підвищеною вихідною потужністю (100 мВт в частотному діапазоні 280-320 ГГц) та високою стабільністю ( $1,5 \cdot 10^{-5}$  від робочої частоти) параметрів генерації. Зокрема, запропоновано метод врахування впливу омичних ВЧ втрат, а також відбиття та трансформації хвиль на кінцях СС на процес генерації коливань в ТГц кліноотронах. Результати, що отримані при аналізі взаємодії інтенсивного стрічкового багаточарового ЕП з електромагнітними хвилями, можуть бути використані у розробці ТГц генераторів з підвищеною потужністю та у разі збудження багаточастотного режиму в кліноотронах.

**Особистий внесок здобувача.** Викладені в дисертації результати отримані самостійно або при його особистій участі. В роботах [1-6, 8, 10-13] здобувач брав участь у постановці та проведенні експериментальних досліджень. В роботах [13, 14] брав участь у проведенні чисельного розв'язування рівнянь руху електронів в електродинамічних системах кліноотронів та у моделюванні процесу взаємодії ЕП з розкидами поздовжніх швидкостей електронів в ЕП з полями гребінчастих СС. В роботах [1, 2, 4, 7, 8, 11] провів розрахунок дисперсійних властивостей СС кліноотронів та опору

зв'язку синхронних просторових гармонік ВЧ поля. В роботах [6, 9, 12] брав участь в розробці теоретичних підходів до аналізу та дослідженні надрозмірних електродинамічних систем ТГц клінотронів, проводив чисельне моделювання електронно-хвильової взаємодії в таких системах. В роботах [1, 11] брав участь в розробці зовнішніх контурів зворотного зв'язку з використанням ПД-схеми управління напругою живлення та потужністю розжарення ТГц клінотрона для стабілізації частоти та потужності випромінювання, розробляв блоки живлення розжарення та напруги, що прискорює, та брав участь у експериментальних дослідженнях параметрів ТГц випромінювання.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідалися та обговорювалися на таких міжнародних конференціях:

XV Kharkiv Young Scientist Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics, Dnepropetrovsk, Ukraine, 2015; 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, Kharkiv, Ukraine, 2016; IEEE International Vacuum Electronics Conference, Monterey, USA, 2016; 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, Lviv, Ukraine, 2017; 2018 Int. Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Kyiv, Ukraine, 2018.

Результати роботи також доповідалися та обговорювалися на науково-кваліфікаційному семінарі «Радіофізика і електроніка міліметрових і субміліметрових хвиль» в ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України.

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані в 14 наукових роботах, у тому числі в 6 статтях у фахових українських та міжнародних наукових журналах [1-6] і 8 тезах доповідей на міжнародних наукових конференціях [7-14].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із анотації, переліку умовних позначень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатка. Її повний обсяг становить 147 сторінок. Дисертація містить 95 рисунків (з них 5 на 2-х окремих сторінках) та 3 таблиці. Список використаних джерел на 14 сторінках нараховує 130 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У Вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету та завдання досліджень, наведено загальну характеристику дисертації.

**Розділ 1** присвячено огляду літератури за темою дисертації. Розглянуто методи розрахунків вихідних параметрів ЛЗХ-клінотронів та сформовано шляхи подальшого розвитку теоретичних моделей ТГц клінотронів. Розглянуто системи формування стрічкового ЕП для ЛЗХ-генераторів ТГц діапазону та методи стабілізації частоти й потужності випромінювання ТГц генераторів. На основі розглянутих літературних даних сформульовані завдання досліджень та методи їх вирішення.

**Розділ 2** присвячено дослідженню процесів взаємодії стрічкового електронного потоку з ВЧ полем гребінчастих СС з урахуванням омичних втрат,



що викликані шорсткістю поверхні СС та тепловим навантаженням на СС. Для оцінки можливості зниження впливу омичних втрат досліджено електромагнітні коливання хвилевода, що навантажений багатоступеневою СС.

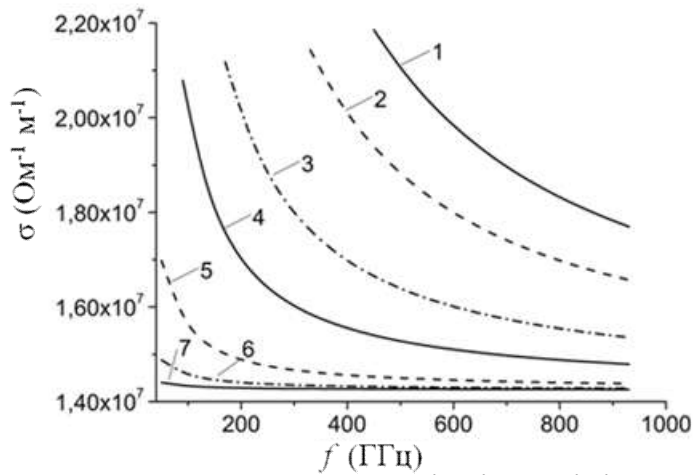


Рисунок 1 – Провідність міді за шорсткості поверхні  $R_a$ : 1) 0,1 мкм, 2) 0,12 мкм, 3) 0,17 мкм, 4) 0,24 мкм, 5) 0,48 мкм, 6) 0,96 мкм, 7) 1,92 мкм

В підрозділі 2.1 наведено результати вимірювання шорсткості поверхні СС, які виготовляються електроерозійним методом в ІРЕ ім. О. Я. Усикова, та за допомогою моделі Хаммерштада-Беккадаля оцінено значення електропровідності металу в залежності від шорсткості поверхні СС (рис. 1).

В підрозділі 2.2 теоретично досліджено температурний розподіл в моделі СС для кліноотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів довжин хвиль та визначено внесок ефекту розсіювання ЕП на поверхні

СС до загальної величини високочастотних омичних втрат.

На рис. 2 наведені результати моделювання вихідної потужності кліноотрона для частотного діапазону 120-140 ГГц в залежності від струму пучка при фіксованій частоті генерації.

Розрахунки виконані з урахуванням зміни провідності СС при збільшенні струму (крива 2). Результати моделювання порівнюються з експериментальними даними, що отримані для кількох десятків генераторів з ідентичними СС. В даному випадку середній період гребінки становить  $p = 0,196$  мм, висота ламелі  $h = 0,453$  мм, а довжина СС  $L_c = 15,22$  мм. Стандартне відхилення  $S$  перерахованих параметрів для даного набору генераторів не перевищує 2,8 %.

Зниження провідності і, отже, зростання втрат зі збільшенням струму пучка призводить до істотного зниження розрахункової вихідної

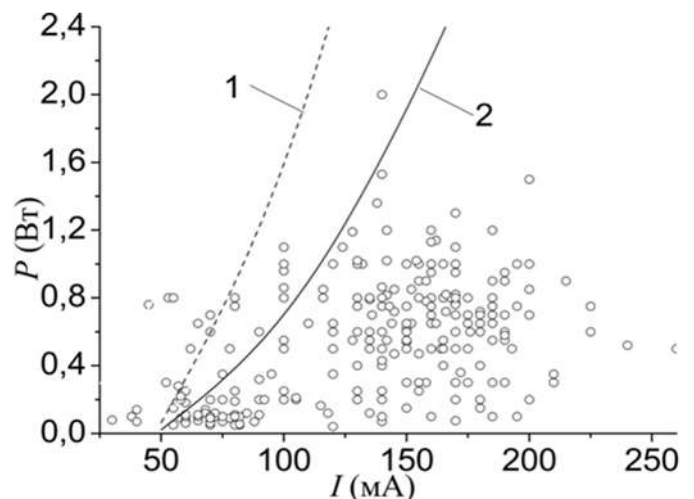


Рисунок 2 – Залежність вихідної потужності  $P_0$  кліноотрона від струму  $I_0$  пучка при  $f_0 = 136,41$  ГГц, (○ - експеримент; 1 – з втратами через шорсткість; 2 – з втратами через шорсткість та теплове навантаження на СС

на СС

потужності. У той же час досягається відповідність таких результатів з експериментом при малій величині просторового заряду. При подальшому збільшенні просторового заряду відмінність між значеннями потужності зростає, що може пояснюватися впливом ряду ефектів. Так, в двовимірній моделі проводиться урахування тільки поперечної компоненти поля просторового заряду, що допускається при значній ширині пучка по відношенню до його товщини. Крім того, при транспортуванні електронного потоку в магнітному полі мають місце діакотронні коливання, вплив яких на ефективність електронно-хвильової взаємодії зростає при зменшенні локалізації високочастотного поля.

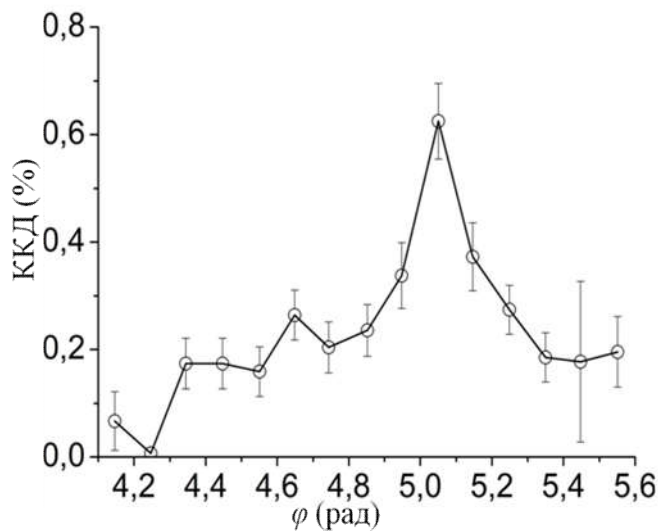


Рисунок 3 – ККД кліноотронів в частотному діапазоні 120-140 ГГц в залежності від зсуву фаз  $\varphi$

В підрозділі 2.3 за допомогою статистичної обробки експериментальних даних для кліноотронів на частотний діапазон 120-140 ГГц з'ясовано оптимальний зсув фаз  $\varphi$  коливань на період СС (рис. 3).

Характеристику побудовано за результатами аналізу приладів з періодом СС  $p = 0,2$  мм. Для даного набору ламп максимальний рівень вихідної потужності становить 2,25 Вт. Такі значення НВЧ-потужності досягаються при робочому струмі електронного пучка більше 150 мА. Електронний ККД генераторів на частотний діапазон 120-140 ГГц, з

урахуванням впливу характеристик виведення енергії, варіюється в межах 0,05 ... 0,7%. Як показано на рис. 3, максимум ККД досягається поблизу зсуву фази 1,613  $\pi$ . Подібні залежності, з вираженим максимумом зсуву фази  $\varphi$ , характерні для кліноотронів у всіх частотних діапазонах. У процесі проведеного аналізу було встановлено, що для діапазону частот 110 ... 140 ГГц оптимальні кути фазового зсуву варіюються від 1,607  $\pi$  до 1,623  $\pi$ .

Підрозділ 2.4 присвячено аналізу дисперсійних характеристик та значень опору зв'язку хвиль в хвилеводах, що навантажені однорідною та багатоступеневою СС. В хвилеводі з багатоступеневою СС присутні хвилі розподіл ВЧ поля яких, за певних значень хвильового числа, є об'ємно-поверхневим, розподіленим, як на поверхні СС, так і в об'ємі. Такі хвилі мають менший зв'язок з СС. Збудження таких хвиль в ТГц кліноотроні дозволяє зменшити вплив ВЧ омичних втрат та збільшити вихідну потужність генератора.

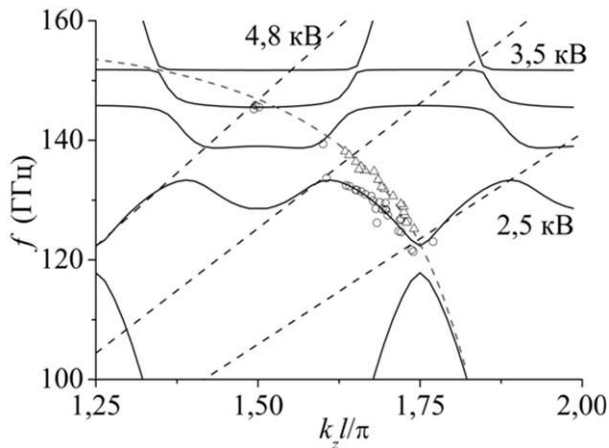


Рисунок 4 – Теоретична дисперсія неоднорідної (суцільні лінії) і однорідної (пунктирна лінія) гребінки разом з експериментальними точками для кліноотронів на 130 ГГц

гребінки базова гребінка була ідентична однорідній.

Проведено експериментальне дослідження частотних характеристик кліноотронів з однорідною та 4-х ступінчастою СС (рис. 4). Виявлено, що оптимальний набіг фази на період коливань для однорідної гребінки є оптимальним й для багатоступінчастої при збудженні об'ємно-поверхневих коливань.

В експериментах потужність випромінювання клиноотрона з однорідною та 4-х ступінчастою гребінками виявилися схожими, хоча згідно з теоретичною моделлю підвищення потужності має бути на частотах вище ніж 100 ГГц в випадку збудження об'ємно-поверхневих хвиль.

**Розділ 3.** В даному розділі досліджується процес взаємодії стрічкового ЕП з поверхневою хвилею ТГц кліноотронів з урахуванням відбиттів та трансформації хвиль на кінцях СС. В ТГц діапазоні класична геометрія клиноотрону є надрозмірною та в просторі взаємодії присутні не лише поверхнева хвиля, з якою взаємодіє ЕП, а й об'ємні хвилі. Такі неоднорідності, як хвилевідний трійник з одного боку СС та колектор електронів з іншого боку СС, призводять до відбиттів та перетворень хвиль.

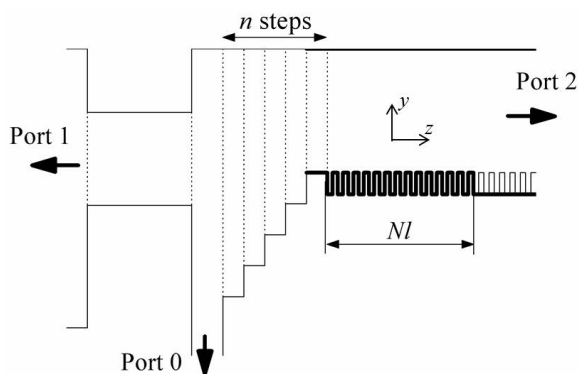


Рисунок 5 – Схема резонатора кліноотрона

Число ступенів системи визначається виходячи зі значення оптимального зсуву фази. Беручи до уваги значення  $\varphi_{\text{опт}}$  для роботи в діапазоні частот 120-140 ГГц, була обрана 4-х ступінчаста плоска гребінка з робочою першою складовою другої смуги пропускання, що впливає з раніше проведеного аналізу (рис. 4).

В підрозділі 2.5 для перевірки ефекту зниження ВЧ омичних втрат шляхом переходу на об'ємно-поверхневі коливання у випадку використання багатоступінчастої СС було розроблено макети кліноотронів з однорідною та 4-х ступінчастою гребінками. Для 4-х ступінчастої

В підрозділі 3.1 сформульовано задачу та описані запропоновані методи її розв'язання.

Розглядається геометрія клиноотрона, що зображена на рисунку 5, де для хвилевідного зчленування в області виводу енергії розглядається задача поширення хвиль через напівнескінченну

СС, яка навантажена на трійник складної форми. Відповідна задача вирішується й для колекторного кінця СС.

В підрозділі 3.2 проведено аналіз дисперсійних характеристик та отримані матриці розсіювання для колекторного ( $R$ ) та гарматного ( $S$ ) кінців СС. Розрахунок матриці розсіювання проводиться методом узагальнених матриць розсіювання.

В підрозділі 3.3 розглядається взаємодія ЕП з ВЧ полем з урахуванням відбиттів та трансформації хвиль на кінцях СС. ВЧ поле має вигляд:

$$\vec{E} = e^{-i\omega t} \sum_m \sum_n \left[ C_m^+(z, t) \vec{E}_{mn}(y, k) e^{ik_{mn}z} + C_m^-(z, t) \vec{E}_{-mn}(y, k) e^{-ik_{mn}z} \right], \quad (6)$$

де  $E_{mn}$ ,  $k_{mn}$  – розподіл електричного поля і хвильове число  $n$ -ї гармоніки  $m$ -ї моди.

Граничні умови на кінцях СС ( $z = 0$ ;  $z = L$ ), як перетворення зворотної хвилі в пряму хвилю і навпаки з урахуванням результатів попереднього розділу, описуються наступним чином:

$$C_m^+(0, t) = \sum_j S_{22}(m, j, f_0) C_j^+(0, t) + \sum_j \frac{dS_{22}(m, j, f_0)}{df} \frac{\partial C_j^+(0, t)}{\partial t}, \quad (7)$$

$$C_m^-(L, t) = e^{i2k_m L} \sum_j \left( R_{11}(m, j, f_0) C_j^+(L, t) + \frac{dR_{11}(m, j, f_0)}{df} \frac{\partial C_j^+(L, t)}{\partial t} + R_{10}(m, j, f_0) \sum_i R_{01}(m, j, f_0) C_j^+(L, t - t_{pl}) e^{i2k_{pl}} \right)$$

Припускається, що тільки одна гармоніка нижчої поверхневої хвилі (0-а), що взаємодіє з ЕП, має значний опір зв'язку. Після визначення всіх амплітуд вихідна потужність визначається як сума потужності мод, що поширюються в вихідний хвилевід:

$$P_{out} = \sum_m \left| \sum_j S_{02}(m, i, f_0) C_j^-(0, t) + \sum_j \frac{dS_{02}(m, i, f_0)}{df} \frac{\partial C_j^-(0, t)}{\partial t} \right|^2. \quad (8)$$

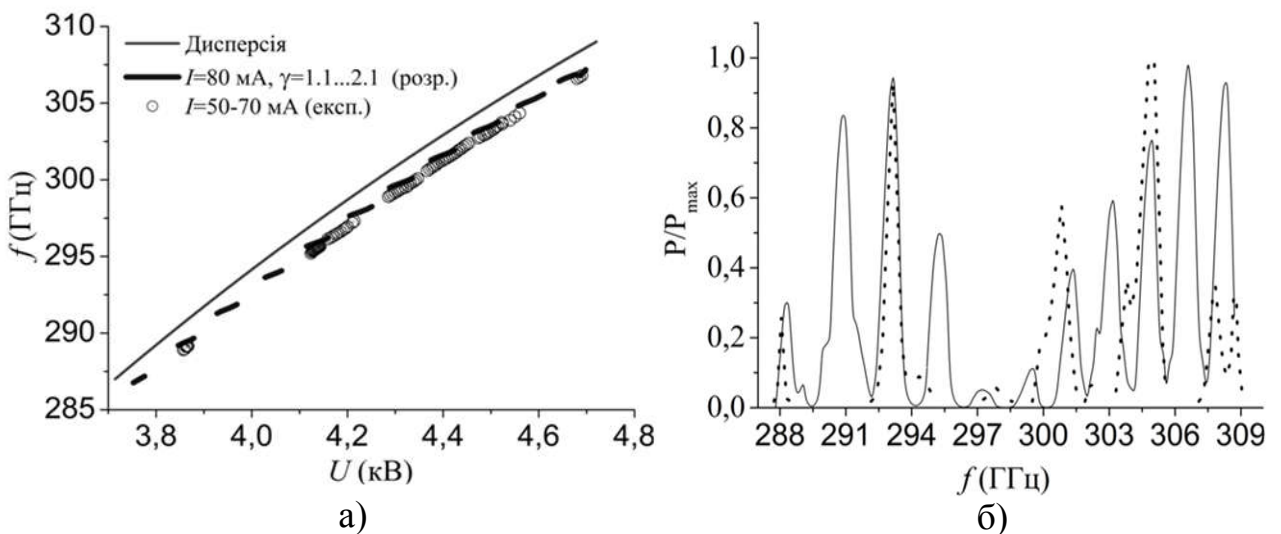


Рисунок 6 – Залежності частоти від напруги, що прискорює (а), та потужності від частоти (б): суцільна – розрахунок, пунктир – експеримент

Підрозділ 3.4 присвячено моделюванню вихідних характеристик кліноотрона на 300 ГГц з урахуванням відбиттів та трансформації хвиль на кінцях СС. При моделюванні розглядалося 5 мод, які розповсюджуються в просторі взаємодії в хвилеводі з гребінкою, що дозволило виявити резонансну поведінку як частоти, так і потужності випромінювання ТГц кліноотрона (рис. 6) навіть у випадку коли, поверхнева хвиля при відбитті від гарматного кінця СС повністю згасає.

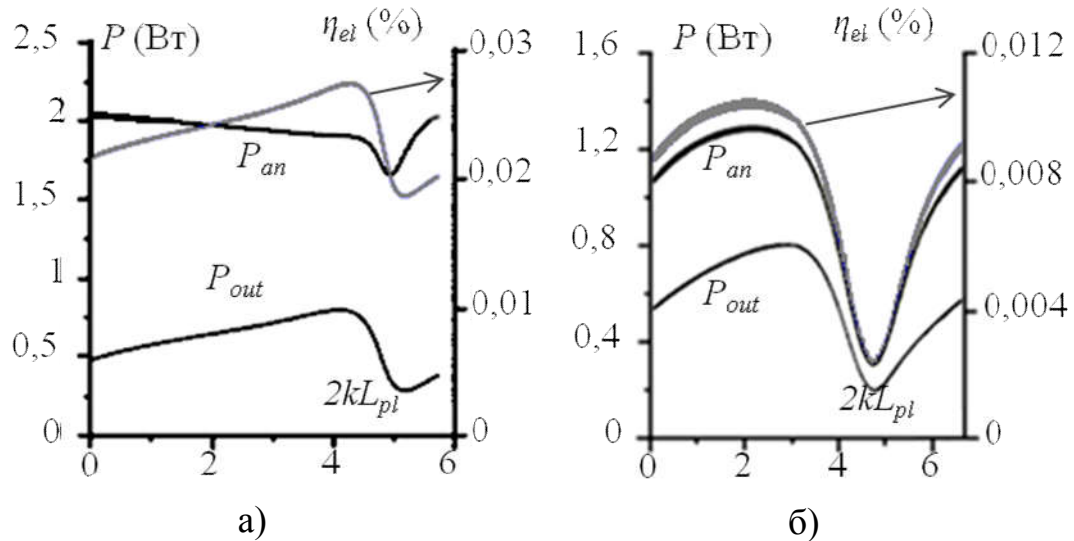


Рисунок 7 – Перерозподіл потужності між анодною лінзою і вихідним хвилеводом та електронний ККД: а)  $f=280$  ГГц, б)  $f=302$  ГГц

Показано можливість управління перерозподілом потужності між плечима хвилевідного трійника біля гарматного кінця СС шляхом зміни умов відбиття біля колекторного кінця. На рисунку 7 зображено перерозподіл потужності, яка поширюється в анодну лінзу і в вихідний хвилевід, та електронний ККД в залежності від положення поршня: при  $f=280$  ГГц (а), при  $f=302$  ГГц (б).

**Розділ 4** присвячено дослідженню електронно-хвильової взаємодії в ТГц кліноотронах з ЕП, який має різні розподіли повздовжніх швидкостей електронів за товщиною пучка. Розглядаються ЕП з профілем повздовжніх швидкостей електронів за товщиною пучка, що виникають внаслідок застосування електронної гармати з несиметричною оптикою.

В підрозділі 4.1 сформульовано задачу та описані запропоновані методи її розв'язання.

Поперечні імпульси, що виникають через вплив анодної лінзи, призводять до поперечного дрейфу електронів і спотворення форми електронного пучка вздовж напрямку його поширення. Так як ширина ЕП значно більша за товщину, то головним чином вплив анодної лінзи суттєвий в напрямку осі  $y$  на рис. 5. А зміщення катоду відносно осі симетрії аноду призводить до розкиду повздовжніх швидкостей електронів по товщині ЕП. Ці ефекти призводять до нерівномірного розподілу щільності струму в області високочастотного поля.

В підрозділі 4.2 проведено моделювання робочих характеристик електронної гармати клінотрона в 3-D наближенні за допомогою розв'язання рівнянь руху електронів і рівняння Пуассона шляхом використання ітераційного підходу та методу кінцевих різниць з релаксацією. Рівняння руху частинок були інтегровані чисельно з використанням метода Рунге-Кутти. У розрахунку розглядаються 200 ліній пучка і 0,5 млн. вузлів. Результати розрахунків перевірялися за допомогою 3-D моделювання в програмному пакеті CST Particle Studio.

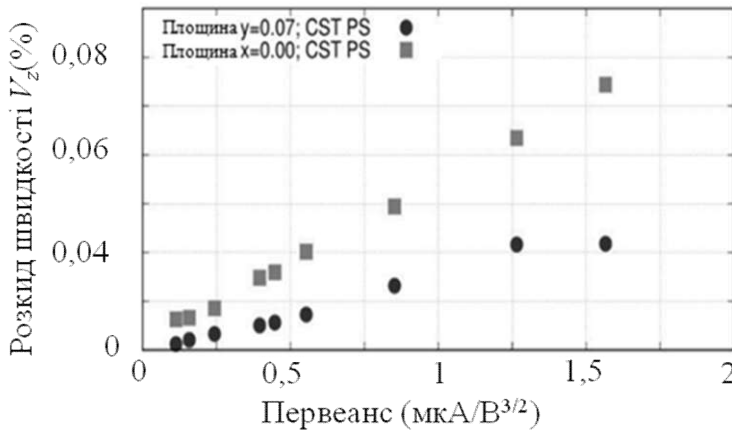


Рисунок 8 – Розкид поздовжніх швидкостей  $V_z$ , як функція первеансу; магнітне поле 1 Тл

анодної лінзи. Як правило, клінотрони працюють з первеансом 0,2 – 2 мкА/В<sup>3/2</sup>. Це відповідає розкиду 0,06 – 0,12 %. Електрони на границях пучка з високою швидкістю  $V_y$  враховуються в площині  $x\theta z$ . Тому розкид відрізняється в площинах  $x\theta z$  і  $y\theta z$ .

Розрахунки показують, що значення розкиду швидкості зменшується до 0,02 – 0,01%, коли пучок поширюється в клінотронному режимі. Це пов'язано з перехопленням електронів поверхнею гребінки і, як наслідок, зменшенням відхилення швидкості за рахунок вилучення частинок з високою швидкістю обертання.

В підрозділі 4.3 досліджується ефективність електронно-хвильової взаємодії поверхневої хвилі з ЕП, який має розкид повздовжніх швидкостей електронів по товщині ЕП внаслідок дії анодної лінзи. Було розглянуто 3 типові випадки розкиду повздовжніх швидкостей: а) одношвидкісний ЕП  $\beta_1 = \beta_0$ ,  $\Delta\beta = 0$  і  $\beta(y) = \beta_0$ ; б) несиметричний ЕП  $\beta_1 = \beta_0 + |\Delta\beta|/2$  та  $\Delta\beta > 0$ ; в) несиметричний ЕП  $\beta_1 = \beta_0 - |\Delta\beta|/2$  та  $\Delta\beta < 0$  (рис. 9), де  $y_0$  – координати центра ЕП, а  $y_1$  та  $y_N$  – координати нижніх та верхніх границь ЕП відповідно.

На додаток до поперечного дрейфу, анодна лінза забезпечує розкид швидкості електронів в пучку. Розкид швидкості, розрахований для площин в точках  $x=0$  мм і  $y=0,07$  мм, представлений на рис. 8 як функція первеансу. Ефект просторового заряду дуже малий, в той час як первеанс менше 0,1 мкА/В<sup>3/2</sup>. У цьому випадку розкид швидкості складає 0,02 % і описує вплив

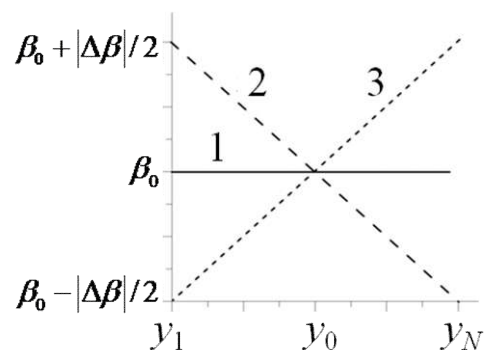


Рисунок 9 – Розподіл розкиду повздовжніх швидкостей за товщиною

В результаті спільного розв'язування рівнянь збудження та рівнянь руху заряджених частинок показано підвищення ефективності електронно-хвильової взаємодії (рис. 10) для випадку,

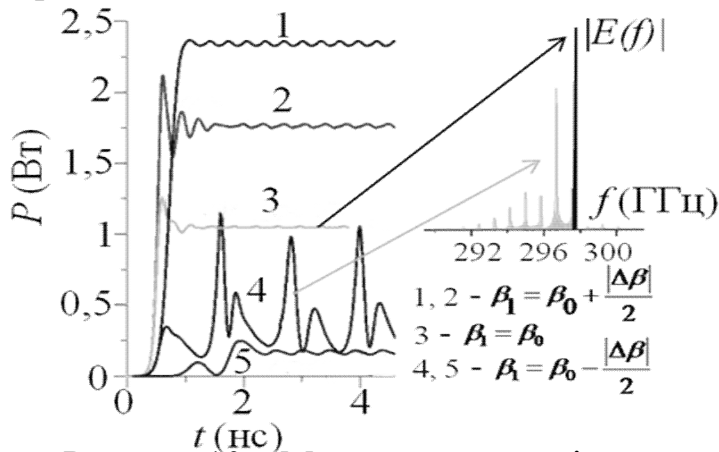


Рисунок 10 – Моделювання вихідної потужності кліноотрона для різних розкидів повздовжніх швидкостей ЕП, струм ЕП складає 320 мА. Вставка – спектр випромінювання кліноотрона для (4).

В підрозділі 4.4 досліджується електронно-хвильова взаємодія поверхневої хвилі з ЕП, який має розкид повздовжніх швидкостей електронів по товщині ЕП випадок (в). Для такого випадку розкиду повздовжніх швидкостей моделювання виявляє появу авто модуляції (рис. 11) внаслідок того, що верхні та нижчі шари ЕП збуджують поверхневу хвилю на різних частотах.

На рисунку 10 зображено результати розрахунків вихідної потужності кліноотрона при струмі ЕП 320 мА для ЕП з розкидами повздовжньої швидкості за товщиною ЕП. Також показано новий метод збудження багаточастотного режиму коливань в кліноотроні. Збудження такого режиму відбувається за рахунок використання ЕП з розкидом повздовжніх швидкостей випадок (в) на рисунку 10 це випадок 4.

Розділ 5 присвячено дослідженню спектральних характеристик ТГц кліноотронів та задачам стабілізації їх частоти та потужності випромінювання з використанням ПІД-схеми управління. Для цієї цілі було розроблено ТГц комплекс, який враховує особливості роботи кліноотронів.

В підрозділі 5.1 проведено аналіз характеристик джерел напруги, що прискорює, для живлення ТГц кліноотронів з використанням ПК та ПІД-схеми управління.

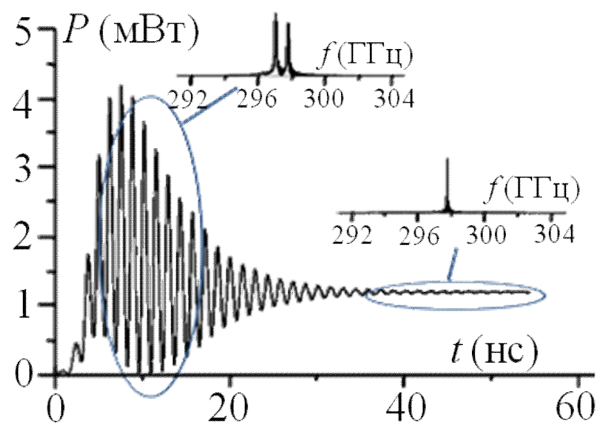


Рисунок 11 – Поява авто модуляції для розкиду повздовжніх швидкостей ЕП випадок (в), струм ЕП складає ~170 мА

коли повздовжня швидкість електронів зростає від верхніх шарів ЕП до нижчих випадок (б) (на рис. 10, випадки 1, 2) по відношенню до одношвидкісного ЕП (на рис. 10, випадок 3). Це підвищення ефективності пояснюється тим, що в кліноотроні нижчі шари ЕП внаслідок нахилу до гребінки взаємодіють з полем більшої амплітуди ніж верхні шари ЕП, а отже, для ефективної віддачі енергії полю мають мати більшу неузгодженість за швидкістю.

електронно-хвильова взаємодія



Рисунок 12 – ТГц комплекс на частоту 300 ГГц

В підрозділі 5.3 відповідно до вимог стабільності потужності випромінювання ТГц джерела живлення для ДПЯ в ЯМР спектроскопії

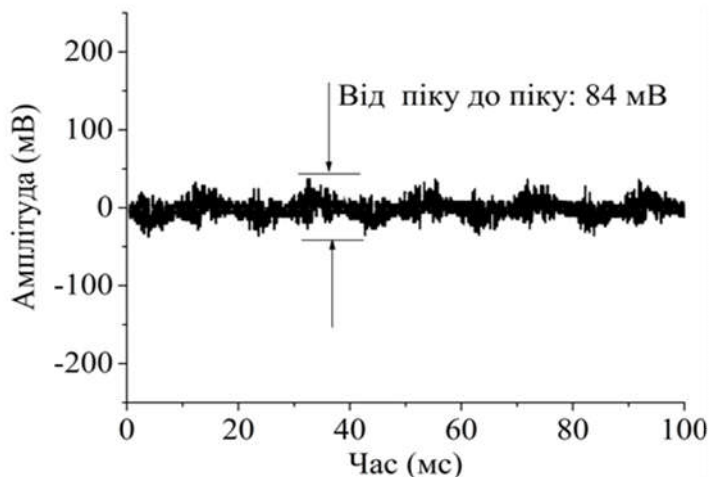


Рисунок 13 – Пульсації напруги, що прискорює, за  $U=4,3$  кВ та  $I=140$  мА

джерел живлення та схем ПІД управління та отримано стабільність потужності випромінювання не гірше 0,5 % в діапазоні потужностей 0,02-0,1 Вт, що в повній мірі задовольняє висунутим вимогам та дозволяє використовувати кліноотрон в комплексах ЯМР-ДПЯ спектроскопії.

В підрозділі 5.4 експериментально досліджено спектральні характеристики ТГц кліноотронів з використанням розроблених джерел живлення та схем ПІД управління.

З огляду на попередні розділи впливає, що як на стабільність частоти випромінювання кліноотронів, так і на ширину спектральної лінії випромінювання впливає багато параметрів, які практично неможливо врахувати. Дослідження впливу нестабільності напруги, що прискорює, на ширину спектральної лінії ТГц кліноотронів показує, що використання джерела живлення високовольтної напруги з пульсаціями напруги краще ніж 100 мВ дає ширину спектральної лінії 4 МГц на частоті 300 ГГц, та за рахунок використання схеми ПІД управління дає стабільність частоти випромінювання

В підрозділі 5.2 розроблено високовольтне джерело живлення (рис. 12) для ТГц кліноотрона, яке має рівень пульсацій високовольтної напруги не більше ніж 100 мВ (рис. 13) в діапазоні напруг 0-6 кВ та струмів 10-200 мА. Такі параметри були обрані з врахування крутизни частотної перебудови ТГц кліноотрона, отриманої в розділі 3, та вимог до стабільності частоти випромінювання кліноотрона, які висуває ЯМР-ДПЯ спектроскопія до ТГц джерела випромінювання.

протягом тривалого часу проведення експерименту (десятки годин), було розроблено джерело живлення розжарення для кліноотрона з можливістю управління джерелом за допомогою ПК, що дозволяє реалізувати ПІД-схему управління потужністю випромінювання ТГц кліноотрона.

Проведено стабілізацію потужності випромінювання кліноотронів на 200, 260 та 300 ГГц з використанням розроблених



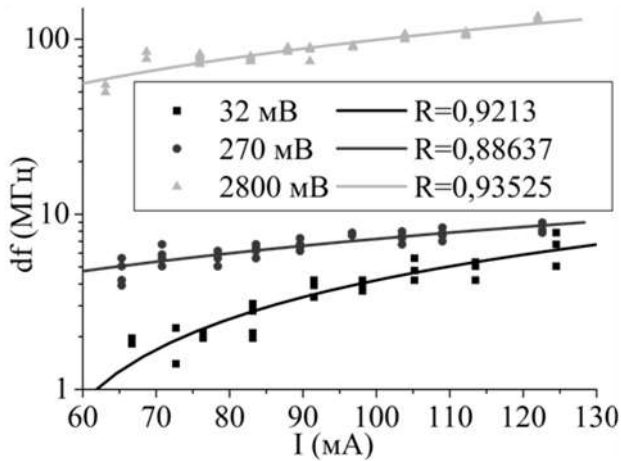


Рисунок 14 – Залежність ширини спектральної лінії від струму ЕП при різних пульсаціях напруги, що прискорює на частоті 300 ГГц

протягом 10 годин роботи комплексу не гірше ніж 5 МГц, що достатньо для використання клінофона як джерела живлення для ДПЯ в ЯМР спектроскопії.

На рисунку 14 зображена залежність ширини спектральної лінії клінофона на 300 ГГц від струму ЕП при пульсаціях напруги, що прискорює, 32, 270 та 2800 мВ. Та одержано, що при пульсаціях напруги, що прискорює, краще ніж 100 мВ ширина спектральної лінії випромінювання клінофона задовольняє вимогам ЯМР-ДПЯ спектроскопії.

## ВИСНОВКИ

В дисертації розв'язано актуальну задачу фізичної електроніки, що полягає в виявленні фізичних особливостей взаємодії нерелятивістського стрічкового ЕП з електромагнітними хвилями, що збуджуються у об'ємних резонаторах з гребінчастими СС, які впливають на стабільність частоти і потужності ТГц випромінювання клінофона. Для вирішення поставлених завдань проведено розрахунки та створено: експериментальні ТГц електронно-вакуумні генератори; джерела живлення напруги, що прискорює; джерела живлення розжарювання та зовнішня схема зворотного зв'язку з ПД управлінням. Досліджено: вплив профілю розкидів повздовжніх швидкостей електронів ЕП на параметри електронно-хвильової взаємодії в резонаторах клінофонів; трансформація та відбиття хвиль на кінцях СС в надрозмірних резонаторах ТГц клінофонів; спектральні характеристик ТГц клінофонів. Основні, найбільш важливі результати і висновки, які впливають з них, зводяться до наступного:

1. Теоретична модель клінофона доповнена врахуванням втрат енергії поверхневої хвилі, що викликані як шорсткістю поверхні СС, так і тепловим навантаженням на елементи СС у разі осідання електронного пучка на СС. За результатами розрахунків вихідної потужності з урахуванням зміни провідності СС від температури виявлено, що в постійному клінофонному режимі залежність вихідної потужності від електронного струму більш полого ніж в імпульсному режимі, що відповідає експериментальним результатам.

2. Розроблено комплекс стабілізації частоти і потужності випромінювання ТГц клінофонів, проведена стабілізація частоти і потужності з використанням ПД-схеми управління і ПК. Показана залежність ширини спектральної лінії ТГц клінофонів від пульсацій напруги, що прискорює, та отримана ширина спектральної лінії клінофона 4 МГц на частоті 300 ГГц.

Використання ПД-схеми управління напругою, що прискорює, та потужністю розжарення дозволяє стабілізувати частоту і потужність випромінювання ТГц клінотронів і отримати значення стабільності, що задовольняють вимогам ЯМР-ДПЯ спектроскопії, які висуваються до джерел ТГц випромінювання.

3. В результаті дослідження впливу розкиду поздовжніх швидкостей електронів по товщині ЕП на ефективність електронно-хвильової взаємодії в клінотронах ТГц діапазону у разі використання несиметричної електронно-оптичної системи, що формує стрічковий електронний потік, показано підвищення електронно-хвильової взаємодії в клінотронному режимі у випадку зростання повздовжніх швидкостей електронів від нижчих шарів ЕП до верхніх.

4. Внаслідок чисельного моделювання електронно-хвильової взаємодії ЕП з розкидом повздовжніх швидкостей електронів за товщиною ЕП з полем гребінчастої СС в клінотронному режимі отримано умови збудження багаточастотного режиму генерації клінотрона у разі зростання повздовжніх швидкостей електронів від верхніх шарів ЕП до нижчих.

5. За допомогою розробленої моделі клінотрона, яка враховує відбиття та трансформацію поверхневих повільних хвиль у швидкі об'ємні хвилі та навпаки на таких неоднорідностях як хвилевідний трійник з одного боку СС, та поршень у колекторного кінця СС, вперше показано резонансний характер збуджених коливань навіть за наявності суттєвих затухань поверхневих хвиль в ТГц діапазоні.

6. Вперше показано вплив відбиття та трансформації хвиль в області колектора на перерозподіл енергії, яка потрапляє у вихідний хвилевід, що проходить крізь анодну апертуру в область гармати, та енергії, що відбивається у напрямку системи, що сповільнює рух хвилі. Показана можливість управління перерозподілом потужності, що поширюється в вихідний хвилевід.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Ковшов Ю. С. Стабилизация частоты электромагнитных колебаний в ЛОВ-генераторах субмиллиметрового диапазона / Ю. С. Ковшов, А. И. Иванов, С. А. Кишко, С. С. Пономаренко, А. Н. Кулешов, Б. П. Ефимов // Вестник ХНУ имени В.Н. Каразина. Серия «Радиофизика и электроника». – 2013. – Т 23, № 1094. – С. 77 – 83.
2. Ковшов Ю. С. Моделирование и экспериментальное исследование характеристик клинотронов непрерывного действия в диапазоне частот 125-135 ГГц / Ю. С. Ковшов, С. А. Кишко, С. С. Пономаренко, С. А. Власенко, Ю. С. Новикова-Коротун, В. В. Завертанный, А. Н. Кулешов // Радиофизика и электроника. – 2016. – Т.7, № 2. – С. 45-52.
3. Ковшов Ю. С. Высоочастотные омические потери в клинотронах непрерывного действия терагерцевого диапазона частот / Ю. С. Ковшов, С. С. Пономаренко, С. А. Кишко, А. А. Лихачев, С. А. Власенко,

В. В. Завертанный, Э. М. Хуторян, А. Н. Кулешов // Радиофизика и электроника. – 2017. – Т.8, № 1. – С. 68-76.

4. Ponomarenko S. S. Numerical simulation and experimental study of sub-thz and thz cw clinotron oscillators / Y. S. Kovshov, S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, E. M. Khutoryan and A. N. Kuleshov // IEEE Trans. on Electron Devices – J2018. – Vol. 65, № 6. – P. 2177-2182, DOI: 10.1109/TED.2018.2792258.

5. Khutoryan E. Excitation of hybrid space-surface waves in clinotrons with non-uniform grating / E. Khutoryan, Yu. Kovshov, A. Likhachev, S. Ponomarenko, S. Kishko, K. Lukin, V. Zavertanniy, T. Kudinova, S. Vlasenko, A. Kuleshov, T. Idehara // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves – 2018. – Vol. 39, № 3. – P. 236 – 249, DOI: 10.1007/s10762-017-0453-3.

6. Kovshov Yu. S. Effect of mode transformation in THz clinotron / Yu. S. Kovshov, S. S. Ponomarenko, S. S. Kishko, A. Likhachev, A. Danik, L. Mospan, S. Steshenko, E. M. Khutoryan, A. N. Kuleshov // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2018. – Vol. 39, № 11. – P. 1055–1064, DOI: 10.1007/s10762-018-0534-y.

7. Kovshov Yu. S. Sub-THz CW clinotrons with multi-stage gratings / Yu. S. Kovshov, S. A. Kishko, S. S. Ponomarenko, A. N. Kuleshov // XV Kharkiv Young Scientist Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics (YSC-2015). – September 29 – October 2, 2015. – P. 1-4.

8. Ponomarenko S. S. Development of compact CW clinotrons for DNP-NMR spectroscopy / S. S. Ponomarenko, Y. S. Kovshov, S. A. Kishko, Y. S. Novikova-Korotun, E. M. Khutoryan and A. N. Kuleshov // 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW). – 2016. – P. 1-4, DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538043.

9. Kishko S. A. Waveguide output for 130 GHz CW clinotron / S. A. Kishko, S. S. Ponomarenko, Yu. S. Kovshov and A. N. Kuleshov // 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW). – 2016. – P. 1-3, DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538044.

10. Ponomarenko S. Numerical simulation and experimental study of 130 GHz CW clinotron oscillator / S. Ponomarenko, Yu. Kovshov, S. Kishko and A. Kuleshov // IEEE International Vacuum Electronics Conference: int. conf. – 19 – 21 Apr. 2016: conf. proc. – Monterey. – P. 1-2.

11. Kovshov Yu. 0.1 – 0.4 THz clinotron table-top modules for spectroscopy applications / Yu. Kovshov, S. Ponomarenko, S. Kishko, S. Vlasenko, A. Lihachev, A. Lukash, A. Danik, E. M. Khutoryan and A. N. Kuleshov // 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering YSF-2017: int. conf., 17-20 Oct. 2017: conf. proc. – Lviv. – P. 275-278.

12. Kovshov Yu. Demonstration of a mode transformation effect in 300-GHz CW clinotron / Yu. Kovshov, S. Ponomarenko, S. Kishko, A. Likhachev, A. Danik, L. Mospan, S. Steshenko, E. Khutoryan and A. Kuleshov // 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.

13. Kovshov Yu. Electron beam velocity spread effect on a clinotron operation / Yu. Kovshov, S. Ponomarenko, S. Kishko, A. Likhachev, A. Danik, V. Zheltov, E. Khutoryan, D. Zahrevskiy, A. Kuleshov // 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.

14. Kovshov Yu. Tracking analysis of a sheet electron beam for clinotron tube / Yu. Kovshov, S. Ponomarenko, S. Kishko, A. Likhachev, A. Danik, E. Khutoryan, D. Zahrevskiy, A. Kuleshov // 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.

## АНОТАЦІЯ

Ковшов Ю. С. Взаємодія електронних потоків з полями електродинамічних систем ТГц клінотронів підвищеної стабільності. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків, 2019.

Головна задача дисертації полягає у виявленні фізичних особливостей взаємодії нерелятивістського стрічкового ЕП з електромагнітними хвилями, що збуджуються в об'ємних резонаторах з гребінчастими СС, які впливають на стабільність частоти і потужності випромінювання ТГц клінотронів. Досліджено вплив трансформації ЕП та розкиду повздовжніх швидкостей електронів за товщиною ЕП на ефективність електронно-хвильової взаємодії. Отримано умови збудження багаточастотного режиму генерації в клінотронах з несиметричною електронно-оптичною системою формування ЕП. Розроблено модель клінотрона, яка демонструє резонансний характер збуджених коливань навіть в випадку суттєвих затухань поверхневої хвилі за рахунок врахування трансформації та відбиттів хвиль на кінцях СС. Розроблено методику стабілізації частоти та потужності ТГц клінотронів з використанням зовнішнього кола зворотного зв'язку та подвійної ПІД-схеми управління джерелами живлення електронної гармати приладу від ПК. Експериментально досліджено залежність ширини спектральної лінії ТГц клінотрона від пульсацій напруги, що прискорює рух електронів, а також від щільності струму електронного пучка. Забезпечена довгострокова стабілізація клінотрона на 300 ГГц. Отримано стабільність частоти краще 5 МГц та потужності на рівні 0,5 % протягом більше 10 годин безперервної роботи.

**Ключові слова:** стрічковий нерелятивістський електронний потік, лампа зворотної хвилі, ТГц клінотрон, стабілізація частоти випромінювання, омічні втрати, відбиття та трансформація хвиль, ПІД-схема управління.

## АННОТАЦИЯ

Ковшов Ю. С. Взаимодействие электронных потоков с полями электродинамических систем ТГц клинотронов повышенной стабильности. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника. – Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 2019.

Главная задача диссертации заключается в выявлении физических особенностей взаимодействия нерелятивистского ленточного ЭП с электромагнитными волнами, возбуждаемыми в объемных резонаторах с гребенчатыми СС, которые влияют на стабильность частоты и мощности излучения ТГц клинотронов. Исследовано влияние трансформации ЭП и разброса продольных скоростей электронов по толщине ЭП на эффективность электронно-волнового взаимодействия. Получены условия возбуждения многочастотного режима генерации в клинотронах с несимметричной электронно-оптической системой, формирующей ЭП. Разработана модель клинотрона, которая демонстрирует резонансный характер возбужденных колебаний даже в случае существенных затуханий поверхностной волны за счет учета трансформации и отражений волн на концах СС. Разработана методика стабилизации частоты и мощности ТГц клинотронов с использованием внешней цепи обратной связи и двухконтурной ПИД-схемы управления источниками питания электронной пушки от ПК. Экспериментально исследованы зависимости ширины спектральной линии ТГц клинотрона от пульсаций ускоряющего напряжения и плотности тока электронного пучка. Обеспечено долговременная стабилизация клинотрона на 300 ГГц. Получена стабильность частоты выше 5 МГц и мощности на уровне 0,5 % в течение более 10 часов непрерывной работы.

**Ключевые слова:** ленточный нерелятивистский электронный поток, лампа обратной волны, ТГц клинотрон, стабилизация частоты излучения, омические потери, отражение и трансформация волн, ПИД-схема управления.

## ABSTRACT

Kovshov Yu. S. Interaction of electron beam with the fields of THz clinotrons with increased stability. – Manuscript.

Thesis for a degree of Candidate in Physics and Mathematics, speciality 01.04.04 – Physical Electronics. – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of National Academy of Science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

The thesis is dedicated to the physical features revealing the interaction of non relativistic sheet electron beam (EB) with the natural modes of the cavity resonator loaded by the slow-wave structure, which influences on the stability of the frequency and radiation power of THz clinotron. The effect of EB transformation and the spread of the longitudinal electron velocities across the EB thickness on the efficiency of the

electron-wave interaction has been investigated. The conditions of an excitation of multi-frequency oscillation mode in a clinotron with an asymmetric electron-optical system are obtained. Clinotron theoretical model, which demonstrates the resonant nature of the excited oscillations even in the case of significant attenuation of the surface wave, has been developed by taking into account the transformation and reflection of waves at the ends of the SWS. The method for stabilizing both operation frequency and output power of THz clinotrons using double PID scheme controlling the high-voltage power supplies of electron gun has been developed and designed. The dependence of the spectra line width of THz clinotron on both accelerating voltage pulsations and electron beam current density was experimentally investigated. The long-term stabilization of 300 GHz clinotron was carried out and the frequency stability was better than 5 MHz with the output power stability of 0.5% for more than 10 hours.

**Keywords:** sheet non relativistic electron beam, backward wave oscillator, THz clinotron, radiation frequency stabilization, ohmic losses, wave reflection and transformation, PID control circuit.