

## ВІДГУК

офіційного опонента Кушніра Володимира Абрамовича  
на дисертаційну роботу Хуторяна Едуарда Михайловича  
«Збудження електромагнітних коливань субтерагерцового та терагерцового  
діапазонів в електронно-вакуумних приладах з просторово розвинутим  
зворотним зв'язком»,  
яку подано до захисту на здобуття наукового ступеня доктора фізико-  
математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка

### 1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Одним із напрямків інтенсивного розвитку електроніки останніх десятиліть є створення джерел електромагнітних коливань у терагерцовому (ТГц) діапазоні частот. Така увага з боку дослідників пояснюється особливостями взаємодії ТГц випромінювання з речовиною, що породило безліч практичних застосунків у різних галузях науки та техніки. В свою чергу це вимагає створення джерел субТГц і ТГц з певними параметрами випромінювання - рівнем потужності, смуги частот, стабільності частоти та потужності, можливості роботи в імпульсному та безперервному режимах тощо. Очевидно, що створення приладів базується на дослідженні й глибокому розумінні фізики процесів генерації та визначення факторів, що впливають на параметри випромінювання. Робота в цьому напрямі інтенсивно ведеться в багатьох наукових центрах світу. Серед існуючих в цей час електронно-вакуумних джерел ТГц діапазону частот слід виділити один з різновидів мазера на циклотронному резонансі - гіротрон і компактні прилади, засновані на взаємодії електронів з повільними хвилями – (лампа зворотної хвилі, клинотрон, генератор дифракційного випромінювання, оротрон тощо). Незважаючи на багаторічні дослідження, низка питань, що стосуються фізичних процесів в цих приборах, залишаються недостатньо вивченими. Це, зокрема, стосується проблем, пов'язаних з підвищенням ефективності зворотного зв'язку та вихідної потужності в гіротронах, що працюють на гармоніках циклотронної частоти, та в компактних приладах О-типу. У той же час розробка і створення таких джерел надзвичайно важливо та актуально для проведення нових наукових досліджень, що динамічно розвиваються в галузі біології і медицини.

Вважаю, що тема дисертаційної роботи Е. М. Хуторяна, яка присвячена вирішенню важливої проблеми підвищення ефективності взаємодії електронних потоків з електромагнітними полями субтерагерцового і терагерцового діапазонів частот в електронно-вакуумних приладах черенковського типу та в мазерах на циклотронному резонансі є **важливою, корисною і актуальною**. Дисертаційна робота виконана в рамках

фундаментальних і прикладних наукових тем відповідно до плану наукових досліджень ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України у рамках Державних наукових програм і пріоритетних напрямів розвитку науки та техніки, що додатково підкреслює актуальність проведених досліджень.

## **2. Ступінь наукової обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, та їхня достовірність**

Результати досліджень дисертації Хуторяна Е. М. отримано з використанням класичних моделей руху заряджених частинок та збудження електромагнітних полів, а також з використанням добре відомих і надійних методів чисельного моделювання та експериментального дослідження. Про достовірність результатів свідчить узгодженість результатів, отриманих за допомогою теоретичних методів, і результатів чисельного моделювання з експериментальними даними, а також з результатами інших дослідників. Результати дослідження автора досить повно відображені в статтях національних і зарубіжних рецензованих журналів з високим рейтингом та були обговорені на численних міжнародних конференціях і семінарах за участю провідних вчених в галузі вакуумної електроніки. Вважаю, що ступінь наукової обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, та їхня достовірність не викликає сумнівів.

У дисертації та наукових працях Хуторяна Е. М., які розкривають її результати, академічного плагіату, фабрикації та фальсифікації не виявлено.

## **3. Структура та зміст дисертації**

Дисертація Хуторяна Е. М. складається із вступу, шести головних розділів, висновків, списку використаних джерел та переліку публікацій автора. Обсяг дисертації становить 355 сторінок, робота містить 128 рисунків, 9 таблиць та 346 бібліографічних джерел, що відповідає чинним вимогам до докторських дисертацій.

*У вступі* (стор. 24-36) обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету та задачі роботи, висвітлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, ступінь їхньої апробації та перелік публікацій за темою дисертації. Також охарактеризовано особистий внесок здобувача у наукових публікаціях.

*У першому розділі* (стор. 37-55) проведено огляд робіт з розробки джерел електромагнітного випромінювання субТГц і ТГц діапазонів, наведено результати досліджень ЕВП на повільних та швидких хвилях, що мають на меті збільшення робочої частоти й потужності, а також розширення частотного перестроювання. Наведено фізичні та технологічні проблеми, що заважають ефективній генерації в розглянутих приладах в ТГц діапазоні. Розглянуто

існуючі та перспективні застосування джерел випромінювання ТГц діапазону й вимоги до них. При цьому автор продемонстрував ерудицію та досить глибоке розуміння сучасного стану досліджень у вибраному ним напрямі діяльності. На підставі представленого аналізу конкретизовано та обґрунтовано завдання, які вирішуються в рамках дисертації.

*Другий розділ* (стор. 56-83) присвячено дослідженню впливу відбиття із затримкою в субТГц гіротроні на фізичні процеси електронно-хвильової взаємодії та параметри вихідного випромінювання. Проведено чисельне моделювання зони генерації й аналіз розподілу збуджених ВЧ полів та електронного ККД. В результаті як теоретичних, та і експериментальних досліджень встановлено, що наявність відбиття приводить до збудження вищих аксіальних мод з підвищеною вихідною потужністю за рахунок взаємодії з прямою хвилею, а також аналізується вплив відбиття на конкуренцію мод першої та другої циклотронних гармонік.

*Третій розділ* (стор. 84-118) містить результати досліджень двопучкового ТГц гіротрона. Показано, що неочікувана сильна конкуренція першої та другої циклотронних гармонік, яка спостерігалась в експерименті, може бути пояснена поза-резонаторною взаємодією та відбиттям і трансформацією мод. Також показано, що розкид поперечної швидкості та радіусу електронів може значно підсилити цей ефект. За запропонованою фізичною моделлю поза-резонаторної взаємодії було проведено чисельне моделювання та фізичний аналіз процесів.

*Четвертий розділ* (стор. 119-190) дисертаційної роботи присвячено дослідженню впливу як технічних факторів (технологічні похибки виготовлення, теплові зміщення, пульсації джерел живлення), так і фізичних факторів (гістерезиси, конкуренція мод) на стабільність вихідних параметрів субТГц гіротронів та шляхів їхньої стабілізації. Розглянуто можливість модуляції частоти в гіротроні для підвищення ефекту ДПЯ для високочастотної ЯМР спектроскопії.

*У п'ятому розділі* (стор. 191-260) теоретично досліджено фізичні процеси в ТГц ЕВП на повільних хвилях при збудженні гібридних об'ємно-поверхневих мод у двовимірному наближенні. Методами чисельного моделювання досліджено різні режими, що відрізняються відношенням енергій, швидкостей об'ємної та поверхневої гармонік, кутом випромінювання, довжиною зворотного зв'язку тощо. Виявлено режими, що можуть призвести до значного зменшення стартового струму та збільшення вихідної потужності.

*У шостому розділі* (стор. 261-284) теоретично досліджено збудження гібридних об'ємно-поверхневих мод та їхньої взаємодії зі стрічковим електронним потоком у тривимірному випадку. Проаналізовано розподіл електромагнітних полів та конкуренцію мод з варіаціями по ширині гребінки.

**Висновки,** що зроблені за проведеними автором дисертації дослідженнями, охоплюють весь обсяг отриманих результатів і є достовірними.

#### **4. Наукова новизна отриманих в роботі результатів, сформульованих положень та висновків**

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

Вперше теоретично й експериментально продемонстровано, що наявність відбиття з затримкою в субТГц гіротроні спричиняє зменшення стартового струму та розширює діапазон частотного перестроювання за рахунок збудження прямої хвилі з великим аксіальним хвильовим числом та має сильний вплив на конкуренцію мод та до складного гістерезису.

Вперше теоретично й експериментально встановлено, що позарезонаторна взаємодія при збудженні мод з вищими радіальними індексами у вихідному конусі в ТГц гіротроні спричиняє різке зростання вихідної потужності на частоті першої циклотронної гармоніки при величинах магнітних полів, які відповідають збудженню мод із дуже високим аксіальним індексом.

Вперше показано, що гіротрон з аксіальним виводом випромінювання набагато менш чутливий до зміщення електронного потоку, тоді як в гіротроні з квазіоптичним конвертором мод вихідна потужність швидко падає з величиною зміщення; при цьому для максимальної вихідної потужності може потребуватися зміна полярності магнітного поля.

Вперше виявлено, що в гіротроні з резонаторі з який утворено слабкоконусною секцією існують «гарячі» моди із великою добротністю.

Розроблено та реалізовано алгоритми стабілізації та модуляції вихідних параметрів гіротронів для підвищення ефекту ДПЯ для ЯМР спектроскопії:

Вперше теоретично знайдено ефективний режим зворотного зв'язку на гібридних об'ємно-поверхневих модах у черенковському генераторі, що є малочутливим до омічних втрат.

Вперше знайдено конфігурацію виводу випромінювання, що забезпечує високу ефективність при збудженні гібридних об'ємно-поверхневих мод.

Вперше теоретично показано можливість ефективного збудження

гібридної об'ємно-поверхневої моди перегрупованим електронним потоком.

Вперше показано, що тривимірний розподіл синхронної гармоніки гібридної об'ємно-поверхневої моди є майже однорідним по ширині при неоднорідному розподілі об'ємної гармоніки, при цьому селекція основної моди відбувається за рахунок високої дифракційної добротності.

Наведені результати є результатами світового рівня, що підтверджується їх висвітленням в міжнародних рецензованих виданнях з високим рейтингом.

## **5. Практичне значення одержаних результатів**

Отримані автором дисертації результати, крім суто наукового, мають і суттєве практичне значення. При цьому деякі з цих результатів вже в даний час використовуються при розробці нових і вдосконаленні існуючих генераторів ТГц діапазону. Прикладом може бути значна роль автора під час розробки та дослідження гіротронів субТГц та ТГц діапазонів частот із підвищеною потужністю та стабільністю, які було застосовано в ДПЯ-ЯМР спектроскопії в університетах м. Фукуї та м. Осаки в Японії. Отримані результати дослідження нових генераторів Черенківського типу дозволять створити нові компактні джерела випромінювання з покращеними характеристиками, що частково вирішить проблему «ТГц провалля» та може бути використано у системах візуалізації тривимірних об'єктів, у біологічних та медичних дослідженнях, радіолокації, матеріалознавстві та в багатьох інших практичних задачах.

## **6. Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях**

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 43 наукових працях, з них 20 фахових наукових статей (18 - у фахових журналах, що відносяться до першого та другого квіртилів Q1-Q2 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports), 1 розділ у колективній монографії, та 22 тези доповідей на міжнародних наукових конференціях. Аналіз друкованих праць дозволяє зробити висновок, що основні результати дисертації викладені повністю.

## **7. Мова та стиль дисертації**

Дисертаційна робота написана державною мовою, поділ на розділи логічний і обґрунтований. Застосована в роботі наукова термінологія є загальноновизнаною, стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, нових наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їхнього сприйняття. Результати проілюстровані високоякісними рисунками, фотоматеріалами та графіками.

## **8. Дискусійні положення та зауваження щодо дисертаційної роботи**

Позитивно оцінюючи результати досліджень, що наведено в дисертаційній роботі в цілому, слід висловити ряд зауважень щодо її змісту та оформлення.

1. При проведенні експериментальних досліджень впливу відбиття в гіротроні найбільш важливий параметр – коефіцієнт відбиття не вимірювався, тому результати експерименту, хоча й узгоджуються з теорією, не мають кількісного характеру, а можуть розглядатися тільки як ілюстрація.
2. При стабілізації параметрів гіротрона недостатня увага приділена дослідженню спектральних характеристик. З наведеної в роботі схеми стабілізації (рис. 4.24) випливає, що було використано канал регулювання через зміну струму розжарення, проте в тексті немає відомостей щодо його використання та ефективності.
3. При моделюванні уповільнювальної структури автор замість омичних втрат в металі враховує втрати у діелектрику з комплексною проникністю, яким заповнені канавки структури. При цьому еквівалентність розглянутих діелектричних втрат омичним втратам в міді не обговорюється.
4. Істотно перевантажений результатами досліджень четвертий розділ дисертації.
5. У тексті трапляються окремі стилістичні неточності, друкарські помилки, професійний сленг і невдалі стилістичні звороти, які, однак, не спотворюють сенсу викладеного матеріалу.

Проте, зазначені недоліки не зачіпають основних положень і результатів дисертації і не применшують її високої теоретичної та науково-практичної цінності.

## **9. Відповідність автореферату змісту дисертаційної роботи**

Автореферат за структурою та технічним оформленням відповідає встановленим чинним вимогам. В ньому повністю відображено загальний зміст та загальні висновки роботи, її актуальність і мету, новизну результатів, особистий внесок та наукові здобутки автора. Автореферат за змістом ідентичний до тексту дисертаційної роботи, яка відповідає паспорту спеціальності 01.04.04.

## 10. Загальний висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам

Дисертаційна робота Хуторяна Едуарда Михайловича «Збудження електромагнітних коливань субтерагерцового та терагерцового діапазонів в електронно-вакуумних приладах з просторово розвинутим зворотним зв'язком» є завершеною науковою працею, в якій отримано нові наукові результати щодо вирішення низки важливих для теорії та практики проблем, пов'язаних з підвищенням ефективності зворотного зв'язку та вихідної потужності в електронно-вакуумних приладах терагерцового діапазону, що засновані на принципах МЦР і черенковського випромінювання. За своєю актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень, за отриманими новими науково обґрунтованими результатами, висновками, практичними рекомендаціями та їхньою реалізацією при розробці приладів дисертація Хуторяна Е.М. вносить вагомий внесок у вирішення проблеми освоєння терагерцового діапазону. Робота відповідає вимогам пп.7,8.9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197, а її автор Хуторян Едуард Михайлович заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
начальник лабораторії НДК «Прискорювач»  
ННЦ «ХФТІ» НАН України

08.01.2024 *В. Кушнір*

Володимир КУШНІР

Підпис Володимира КУШНІРА засвідчую.

В.о. генерального директора  
Національного наукового центра  
«Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,  
академік НАН України



Ігор ГАРКУША