

## ВІДГУК

офіційного опонента Одаренка Євгена Миколайовича  
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

Актуальність теми дисертаційної роботи Е. М. Хуторяна обумовлена сучасними тенденціями освоєння терагерцового діапазону. Розв'язання цієї задачі ускладнюється через відсутність необхідної номенклатури джерел електромагнітного випромінювання в субтерагерцовому та терагерцовому діапазонах. Компактні прилади вакуумної електроніки, що застосовуються в діапазоні міліметрових хвиль, мають суттєво меншу ефективність при переході до частот терагерцового діапазону через низку фізичних та технічних чинників. Тому наразі проводяться доволі інтенсивні експериментальні та теоретичні дослідження, спрямовані на пошук шляхів подолання дії цих чинників та відповідного підвищення ефективності таких приладів. В даній дисертаційній роботі досліджуються підходи та методи, що дозволяють збільшити ефективність генерації в терагерцових електровакуумних приладах двох типів: гіротронах та резонансних генераторах О-типу з розподіленою взаємодією.

Зокрема, це подолання конкуренції мод, резонансних з вищими циклотронними гармоніками та першою гармонікою для зменшення робочого магнітного поля гіротрона; розширення діапазону частотного перестроювання гіротронів за рахунок резонансу з вищими аксіальними модами, тощо. В електровакуумних приладах зі сповільнювальними структурами однією з найбільших проблем є суттєве зменшення ефективної товщини області інтенсивного високочастотного поля електродинамічної системи при збільшенні частоти генерації. Також існує багато інших негативних факторів, як то зменшення ефективності зворотного зв'язку та виводу випромінювання через збільшення омичних втрат та надрозмірності структур.

Існуючи підходи для розв'язання зазначених проблем мають обмеження, особливо при збільшенні частоти генерації аж до терагерцового діапазону.

Тому тема дисертаційної роботи, присвяченої визначенню методів підвищення ефективності електровакуумних приладів субтерагерцового та терагерцового діапазонів є **важливою, корисною і актуальною**.

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

Дисертаційну роботу виконано у відділі дифракції та дифракційної електроніки Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України. Дисертаційна робота відповідає одному з напрямків наукових досліджень (електроніка і радіофізика міліметрових і субміліметрових хвиль), затверджених постановою Президії НАН України № 30 від 11.02.2009 р. та

здійснювалась відповідно до плану наступних держбюджетних науково-дослідних робіт ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України: «Електродинаміка відкритих резонансних систем та періодичних структур із композитними матеріалами; розробка когерентних джерел і вимірювальних пристроїв міліметрового та субміліметрового діапазонів електромагнітних хвиль» (шифр «СТАРТ 2», номер держреєстрації 0107U001082); «Електродинаміка відкритих резонансних систем, періодичних структур із композитними матеріалами та антенних систем; прямі та зворотні задачі; розробка когерентних джерел, елементної бази і вимірювальних пристроїв міліметрового та субміліметрового діапазонів електромагнітних хвиль» (шифр «СТАРТ 3», номер держреєстрації 0111U010480); «Генерація, посилення, детектування та розповсюдження терагерцевого випромінювання; електродинамічне моделювання та експеримент» (шифр «СТАРТ 4», номер держреєстрації 0117U004034); «Нові теоретичні та експериментальні методи в електродинамічному моделюванні, генерації та випромінюванні електромагнітних хвиль гігагерцевого та терагерцевого діапазонів частот» (шифр «СТАРТ 5», номер держреєстрації 0120U100980).

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

Наукова обґрунтованість результатів досліджень, сформульованих в дисертації Е. М. Хуторяна, базується на застосуванні добре апробованих і надійних методів теоретичного аналізу, чисельного моделювання та експериментального дослідження. Результати, отримані різними методами, порівнювались, а також проводився їх фізичний аналіз та було виявлено їх добру узгодженість та фізичне обґрунтування, що також підтверджує достовірність отриманих результатів та висновків. На додаток усі результати та висновки, відображені у дисертації, були опубліковані в рецензованих високореєтингових наукових журналах та доповідались на міжнародних конференціях та семінарах.

### **4. Структура та зміст дисертації**

Дисертаційна робота складається з вступу, шести розділів (один оглядовий та п'ять робочих), висновків, списку використаних джерел та переліку публікацій автора за темою роботи. Обсяг дисертації становить 356 сторінок, зі 128 рисунками, 9 таблицями та 346 бібліографічними джерелами, що відповідає чинним вимогам до докторських дисертацій.

*У вступі* (стор. 25-34) наведено нагальні проблеми сучасної терагерцевої вакуумної електроніки та сформульовано актуальність, мету і задачі проведених досліджень, а також наведено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Надається ступінь апробації та перелік публікацій за темою дисертації та особистий внесок Е. М. Хуторяна у наукових публікаціях.

*Перший розділ* (стор. 37-55) присвячено огляду існуючих світових досягнень на шляху освоєння терагерцевого діапазону за допомогою електровакуумних приладів та проблем, що постають при просуванні в цей

діапазон. Також обговорюються специфічні вимоги до параметрів випромінювання, що висувуються з боку наукових та практичних застосувань.

**Другий розділ** (стор. 56-83) присвячено дослідженню роботи гіротрону з аксіальним виводом випромінювання при наявності відбиття сигналу з затримкою. Це дослідження було вмотивоване результатами експериментальних досліджень, де спостерігався суттєвий вплив навантаження на параметри випромінювання. Тому в розділі наведено результати як експериментальних, так і теоретичних досліджень. Показано, що відбиття сигналу не тільки зменшує стартові струми приладу, але і може призводити до суттєвого збільшення вихідної потужності при виконанні умови циклотронного резонансу для прямих мод (мод із позитивним хвильовим числом). Таким чином може реалізуватися розширення частотного діапазону гіротрону. Також показано, що завдяки конкуренції аксіальних мод можуть спостерігатися складні гістерезисні явища при зміні параметрів навантаження (коефіцієнту відбиття та відстані) або напруги живлення. Показано, що розглянутий ефект може бути використано для керування процесами конкуренції мод першої та другої циклотронних гармонік за умови регулювання коефіцієнтом та часом затримки відбиття.

**Третій розділ** (стор.84-118) присвячено дослідженню особливостей роботи двопучкового терагерцового гіротрона з аксіальним виводом випромінювання, в якому експериментально спостерігалась сильна конкуренція мод першої та другої циклотронних гармонік, хоча за результатами попереднього чисельного моделювання передбачалось одномодове коливання на частоті другої циклотронної гармоніки. Для пояснення цього явища запропонована модель позарезонаторної (за межами основного резонатору) взаємодії з вищою радіальною модою. При чисельному аналізі такої моделі показано, що посилення цього ефекту та, відповідно, узгодження з експериментальними даними відбувається при розкиді поперечної швидкості електронів, а також при відбитті і трансформації мод від вихідного вікна. Ці дослідження, з одного боку, дозволяють знайти умови для розширення частотного діапазону генерації на першій циклотронній гармоніці, а з іншого – знайти умови придушення моди першої циклотронної гармоніки та стійкої генерації на другій циклотронній гармоніці.

**Четвертий розділ** (стор. 119-190) присвячено дослідженню роботи гіротрону при зміщенні осі електронного потоку, тепловому розширенні резонатору, появі відбитих електронів, пульсації джерел живлення. Розглянуто, як ці ефекти впливають на залежність вихідної потужності від частоти. Особливу увагу приділено вивченню виникаючих при цьому конкуренції мод і гістерезисних явищ, а також часових залежностей експлуатаційних параметрів та роботи гіротрону в режимі стабілізації та модуляції параметрів, а також в імпульсному режимі. Результати теоретичних досліджень дозволили пояснити явища, що спостерігались експериментально, зокрема поведінку вихідної потужності при зміщенні осі електронного потоку відносно осі резонатору та конкуренцію мод в імпульсному гіротроні при збільшенні напруги. Результати експериментальних досліджень дозволили створити системи стабілізації та

модуляції вихідної потужності та частоти та застосувати відповідні гіротронні комплекси в ДПЯ-ЯМР спектроскопії.

*П'ятий розділ* (стор. 191-260) присвячено теоретичному дослідженню в рамках двовимірної моделі модифікації резонансного генератора О-типу з розподіленою взаємодією, що працює на гібридних об'ємно-поверхневих модах. Показано, що омичні втрати призводять до суттєвого зменшення як ефективності електронно-хвильової взаємодії, так і вихідної потужності в традиційних генераторах в субтерагерцовому та терагерцовому діапазонах. Для збільшення ефективності як зворотного зв'язку так і виводу випромінювання запропоновано збудження гібридної моди, об'ємна гармоніка якої є зворотною та забезпечує зворотний зв'язок, що є малочутливим до омичних втрат. Показано, що для випадку, коли електронний потік рухається паралельно поверхні сповільнювальної структури, особливо ефективним є режим однократного відбиття об'ємної хвилі від верхнього рефлектору. Використання подвійних решіток, що підтримують гібридні об'ємно-поверхневі моди, дозволяє не тільки збільшити товщину електронного потоку, але і значно розширити діапазон частотного перестроювання.

*Шостий розділ* (стор. 261-284) присвячено тривимірному теоретичному дослідженню резонансного генератора з розподіленою взаємодією, що працює на гібридних об'ємно-поверхневих модах. Розглянуто випадок планарної сповільнювальної структури та стрічкового електронного потоку, ширина яких в декілька разів більша за довжину хвилі. Показано, що, незважаючи на надрозмірність такої структури, можлива реалізація одномодового режиму генерації з рівномірним розподілом синхронної гармоніки по ширині електронного потоку, що забезпечує збільшення вихідної потужності порівняно з традиційними генераторами з широкими стрічковими потоками. Окремо, в «холодній» структурі розглянуто міжтипову взаємодію мод, що мають варіації по ширині сповільнювальної структури, та робляться висновки про її вплив на роботу «гарячої» електронно-хвильової системи.

Висновки (стор. 285-289), зроблені за проведеними в дисертаційній роботі дослідженнями, охоплюють весь обсяг отриманих результатів.

Дисертація є завершеною роботою, зроблені висновки висвітлюють основні результати експериментальних та теоретичних досліджень, які роблять важливий внесок в розвиток фізичних уявлень про закономірності фізичних процесів в електровакуумних приладах терагерцового та субтерагерцового діапазонів.

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

Наукова новизна дисертаційної роботи визначається побудовою Е. М. Хуторяном нових фізичних та математичних моделей, за допомогою яких було отримано нові фізичні результати щодо режимів роботи електровакуумних приладів терагерцового діапазону, з'ясовано природу явищ, що спостерігались в експериментах та знайдено шляхи збільшення ефективності генерації

терагерцового випромінювання. Слід відзначити такі основні результати, отримані в дисертаційній роботі:

- виявлено, що часткове відбиття вихідного випромінювання назад до резонатору суттєво підвищує потужність взаємодії електронного потоку з прямим хвилями та їх вихідну потужність, та призводить до розширення діапазону частотного перестроювання. Знайдено умови генерації на другій циклотронній гармоніці з урахуванням частотної залежності коефіцієнта відбиття;
- показано, що при певній геометрії дифракційного виводу енергії, характерного для терагерцового гіротрону та при певному розподілі магнітного поля, що відповідає сучасним моделям надпровідникових магнітів, електронний потік, згрупований в основному резонаторі робочою модою, може ефективно збуджувати вищу радіальну моду у просторі дифракційного виводу, що в термінології гіротронів має назву позарезонаторної взаємодії. Показано, що цей ефект призводить до суттєвого збільшення вихідної потужності при певних значеннях магнітного поля, особливо при розкіді поперечної швидкості електронів;
- знайдено шляхи зменшення негативного впливу зсуву осі електронного потоку в субтерагерцовому гіротроні при конкуренції мод з різними напрямками обертання;
- запропоновані методи керування вихідними параметрами гіротрону та реалізації стабілізації і модуляції потужності та частоти випромінювання;
- визначено режим однократного відбиття об'ємної гармоніки від верхнього рефлектору в резонансному генераторі з розподіленою взаємодією на гібридних об'ємно-поверхневих модах, що приводить до підсилення зворотного зв'язку та зменшення стартового струму при збільшенні довжини сповільнювальної системи навіть при великих омичних втратах. Також показано, що зі збільшенням довжини сповільнювальної системи в нелінійному режимі при перегрупуванні електронного потоку не настає насичення потужності взаємодії, як це відбувається в традиційних генераторах.

Усі вищенаведені результати опубліковано в рецензованих виданнях світового рівня.

## **6. Практичне значення одержаних результатів**

Мета проведених в дисертаційній роботі досліджень полягає у розвитку генераторів терагерцового випромінювання з підвищеною ефективністю електронно-хвильової взаємодії та розширеним діапазоном частотного перестроювання. Важливість цих наукових пошуків виокремлюється не лише для отримання нових знань, а й для забезпечення потреб у ефективних джерелах терагерцового діапазону для розвитку як наукових напрямків так і практичних застосувань, які базуються на використанні цього випромінювання

Практичне значення одержаних результатів визначається значним попитом на компактні джерела субтерагерцового та терагерцового

випромінювання з боку як наукових так і практичних застосувань. Так, гіротрони з покращеними характеристиками та з системами стабілізації та модуляції, що були отримані за результатами роботи, застосовувались для біологічних досліджень за допомогою ДПЯ-ЯМР спектроскопії в лабораторіях Японії. Отримані знання та методи підвищення ефективності генерації в терагерцовому діапазоні є корисними для створення нових модифікацій генераторів з покращеними характеристиками для багатьох практичних застосувань.

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

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано та повністю викладено в 43 наукових працях: 20 наукових статей (18 – у спеціалізованих журналах, що відносяться до першого та другого кuartилів Q1-Q2 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports), 1 розділ у колективній монографії, та 22 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

## **8. Мова та стиль дисертації**

Дисертаційну роботу написано державною мовою та науковим стилем із застосуванням загальноприйнятої наукової термінології. Як теоретичні, так і експериментальні дослідження викладено зрозумілою мовою та в логічній послідовності. Отримані результати, наукові положення та висновки наведено чітко та недвозначно. Результати проілюстровано рисунками та графіками, що є адекватними та добре зрозумілими.

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

Незважаючи на загальну позитивну оцінку дисертаційній роботі, в ній мають місце дискусійні положення та виникають певні зауваження.

1. В формулюваннях новизни отриманих результатів багато абстрактних висловів: «зменшення стартового струму», «складний гістерезис», «різке зростання вихідної потужності», «може призвести». Доцільно було б навести хоча б декілька конкретних числових значень.
2. В роботі практично відсутній розгляд впливу просторового заряду на закономірності електронно-хвильової взаємодії. Разом з тим, в електровакуумних приладах терагерцового та субтерагерцового діапазонів навіть незначний вплив цього фізичного чинника призводить до суттєвих змін умов енергообміну між електронним потоком та високочастотним полем.
3. Автор використовує для теоретичного дослідження доволі розвинені методи математичного моделювання фізичних процесів в електронно-хвильових системах. В рамках цих моделей можна аналізувати широкий спектр як мікро-, так і макропроцесів. Але в роботі в основному розглядаються інтегральні характеристики приладів без поглибленого

аналізу фазування електронів в полях електродинамічних систем та відповідного траєкторного аналізу.

4. В роботі розглядається лише дві фракції електронного потоку для дослідження впливу розподілу швидкостей електронів на процес електронно-хвильової взаємодії за межами резонатора гіротрону. Для отримання вірогідних результатів необхідно було б збільшити кількість цих фракцій.
5. При дослідженні терагерцових генераторів О-типу не враховується скінченність індукції фокусувального магнітного поля та вельми імовірна його просторова неоднорідність. Крім того, суттєвим фактором, що істотно впливає на ефективність електронно-хвильової взаємодії в приладах терагерцового діапазону, є високочастотне розшарування електронного потоку.
6. Вважаю невдалою назву підрозділу 5.2. «Вплив зменшення резонансності електродинамічної системи клинотрону при збільшенні омичних втрат на вихідні характеристики».
7. В роботі використовуються аббревіатури на різних мовах, що ускладнює розуміння тексту. Крім того, одночасно використовуються позначення діапазонів в одиницях частоти (терагерцовий) та довжини хвилі (міліметровий).
8. Робота рясніє невірним застосуванням відмінків. Поряд з цим, в тексті наявні граматичні помилки навіть в термінології. Наприклад, «многомодова» теорія.

Зазначені зауваження дещо погіршують враження від дисертаційної роботи, але не впливають принципово на позитивну оцінку результатів проведених досліджень.

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

Автореферат за структурою та оформленням відповідає чинним вимогам. В ньому відображені основні результати дисертаційної роботи та наукові здобутки автора. Зміст автореферату повністю ідентичний тексту дисертаційної роботи.

#### **11. 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 обґрунтовані та достовірні наукові результати спрямовані на вирішення ключових теоретичних і практичних проблем, пов’язаних з підвищенням ефективності зворотного зв’язку та вихідної потужності електровакуумних приладів, які працюють у субтерагерцовому та терагерцовому діапазонах.

Автореферат за змістом є ідентичним до тексту дисертаційної роботи, яка відповідає паспорту спеціальності 01.04.04 – фізична електроніка.

Дисертація Хуторяна Е.М. відповідає вимогам щодо уникнення академічного плагіату, фабрикації та фальсифікації та відповідає вимогам пп. 7,8,9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197, а її автор Хуторян Едуард Михайлович заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка.

**Офіційний опонент:**

професор кафедри фізичних основ  
електронної техніки  
Харківського національного університету  
радіоелектроніки  
доктор фізико-математичних наук

Євген ОДАРЕНКО

Підпис Одаренка Є.М. засвідчую  
Проректор з наукової роботи ХНУРЕ



Юрій РОМАНЕНКОВ