

## РЕЦЕНЗІЯ

на дисертацію

Лихачова Олександра Олександровича

“Спектральні характеристики та стабільність випромінювання клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів з урахуванням особливостей процесів енергообміну”, подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – фізика та астрономія

### **Актуальність дослідження.**

Дисертаційна робота О. О. Лихачова присвячена розробці генераторних комплексів електромагнітного випромінювання міліметрового та субміліметрового діапазонів на основі клинотронів, в яких завдяки перестроюванню частоти генерації в широких діапазонах реалізовано частотну модуляцію випромінювання як в безперервному режимі, так і в режимі ступеневої зміни частоти, що має важливе значення для практичних застосувань у задачах тривимірної візуалізації об'єктів у радіолокації, ТГц баченні та багатьох інших. Протягом останніх декількох десятиліть тривають роботи з опанування ТГц діапазону та вирішення проблеми «ТГц провалля», що пов'язано з відсутністю потужних компактних джерел електромагнітного випромінювання з перестроюванням частоти в широкому діапазоні для великою кількості практичних застосувань. Квантові генератори, які ефективні у оптичному й інфрачервоному діапазонах, у ТГц діапазоні мають лише декілька частот генерації, що відповідають коливальним та обертальним рівням активних середовищ, таких як пара молекул води та HCN. В той же час бурхливий розвиток напівпровідникових генераторів ще не привів до підвищення їхньої вихідної потужності до рівнів, що потрібні для багатьох практичних задач. Тож розробка генераторних систем на основі компактних вакуумних електронних приладів електромагнітного випромінювання міліметрового та субміліметрового діапазонів типу клинотрон з підвищеними рівнями вихідної потужності та перестроюванням

частоти генерації в широкому діапазоні є актуальною задачею, якій і присвячено дисертаційну роботу.

Метою наукових досліджень дисертаційної роботи є встановлення впливу розкиду швидкостей електронів інтенсивних стрічкових пучків, що викликані пульсаціями прискорювальної напруги та параметрами високовольтного живлення, на ефективність взаємодії електронних пучків з електромагнітними хвилями та спектральні параметри випромінювання клинотронів для реалізації частотної модуляції генерації як в безперервному режимі, так і в режимі дискретного перестроювання частоти. В дослідженнях значна увага приділяється процесам формування інтенсивних стрічкових електронних пучків та їх взаємодії з електромагнітними хвилями, що збуджуються в надрозмірних електродинамічних системах клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів, а також впливу зазначених процесів на спектральні характеристики випромінювання приладів.

### **Ступінь наукової обґрунтованості та наукова новизна результатів роботи.**

Достовірність результатів дисертаційної роботи базується на використанні класичних моделей траєкторного аналізу руху пучків заряджених частинок та їх взаємодії з електромагнітними полями, порівнянні результатів теоретичних досліджень з результатами моделювання в чисельних кодах, а також використанні класичних експериментальних методів досліджень параметрів електромагнітного випромінювання міліметрового та субміліметрового діапазонів.

Наукова новизна дисертаційної роботи Лихачова О. О. визначається наступним:

1. За результатами моделювання траєкторій електронів інтенсивного стрічкового пучка, що формується у діодній гарматі у присутності статичного магнітного поля, та проведеними експериментальними дослідженнями встановлено вплив величини пульсацій прискорювальної напруги на розкид швидкостей електронів пучка та вперше визначено

максимальний рівень пульсацій напруги, вплив яких на розкид швидкостей електронів пучка є незначним у порівнянні з впливом інших фізичних факторів.

2. Вперше встановлено залежність спектральних характеристик випромінювання клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів від резонансних властивостей електродинамічної системи приладів, а також від розкиду швидкостей електронів інтенсивних стрічкових пучків, що викликано пульсаціями прискорювальної напруги.

3. За результатами моделювання електронно-хвильової взаємодії в електродинамічних системах клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів було запропоновано та вперше експериментально реалізовано моделювання частоти випромінювання генераторної системи на основі клинотронів як у режимі безперервної модуляції, так і у режимі дискретної модуляції частоти.

**Структура і зміст дисертації.** Результати дисертаційної роботи повністю відображено у 9 публікаціях: в 5 наукових статтях, з яких 4 індексуються в міжнародних наукометричних базах даних Web of Science та Scopus і одну статтю опубліковано у фаховому науковому виданні України, а також у 4 збірниках матеріалів доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Дисертація містить анотацію, вступ, чотири розділи, висновки, перелік використаних джерел та перелік публікацій автора.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету та задачі роботи, наведено стислу характеристику результатів, ступінь їх апробації та перелік публікацій.

У *першому розділі* дисертаційної роботи проведено огляд робіт з розробки джерел електромагнітного випромінювання міліметрового та субміліметрового діапазонів, наведено результати досліджень спектрів випромінювання вакуумних електронних приладів зазначених діапазонів, а

також зроблено аналіз генераторних систем з модуляцією частоти для практичних застосувань.

*Другий розділ* дисертаційної роботи присвячено дослідженню впливу параметрів інтенсивних стрічкових електронних пучків, що формуються електронною гарматою клинотрона, на стабільність параметрів випромінювання приладу. Проведено траєкторний аналіз руху стрічкових електронних пучків і встановлено залежності розкиду повздовжніх швидкостей електронів пучка від щільності електронів та від пульсацій прискорювальної напруги. Особливу увагу приділено розробці системи живлення електронних гармат клинотронів з декількома контурами зворотного зв'язку для стабілізації параметрів випромінювання приладів.

*Третій розділ* роботи містить результати досліджень спектральних властивостей випромінювання клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів. У розділі представлено результати моделювання електронно-хвильової взаємодії в електродинамічних системах клинотронів і показано, що резонансні властивості випромінювання у приладах міліметрового діапазону визначаються відбиттями поверхневої хвилі від границь гребінки, у той час як у субміліметровому діапазоні резонансність зумовлено відбиттями та трансформацією як поверхневих, так і об'ємних хвиль у надрозмірних електродинамічних системах приладів. За результатами моделювання та експериментальних досліджень отримано залежності спектрів випромінювання клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів від щільності електронних пучків, а також від пульсацій високовольтної напруги, що прискорює електрони пучка.

*Четвертий розділ* дисертаційної роботи є заключним, що містить результати досліджень режимів модуляції частоти генерації клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів. За результатами моделювання залежностей частоти генерації клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів від прискорювальної напруги було продемонстровано та вперше експериментально реалізовано модуляцію частоти генерації приладів як в безперервному режимі в межах однієї зони

генерації, так і в режимі дискретного перестроювання частоти завдяки послідовним переходам між зонами генерації приладу.

**Практичне значення наукових результатів,** отриманих у дисертаційній роботі Лихачова О. О., полягає у розробці генераторних комплексів міліметрового та субміліметрового діапазонів частот, які здатні забезпечити високостабільну генерацію для практичних застосувань у ЯМР спектроскопії з динамічною поляризацією ядер, а також здатні забезпечити режими генерації з модуляцією частоти як у безперервному режимі (FMCW), так і в режимі модуляції з дискретним перестроюванням частоти (step-frequency tuning) у широкому діапазоні частот для застосувань у системах візуалізації тривимірних об'єктів у біології, медицині, радіолокації, матеріалознавстві та в багатьох інших практичних задачах.

**Відомості про дотримання академічної доброчесності.** У дисертаційній роботі та публікаціях Лихачова О. О. відсутні порушення академічної доброчесності.

#### **Зауваження до дисертаційної роботи.**

1. В роботі було б дуже цікавим дослідити фазові портрети поведінки електронів стрічкових пучків під час їх взаємодії з електромагнітними хвилями в електродинамічних системах клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів, що дало б додаткову інформацію про ефективність електронно-хвильової взаємодії.

2. Для більш глибокого розуміння отриманих в дисертації результатів траєкторного аналізу руху інтенсивних стрічкових електронних потоків як в області електронної гармати, так і в просторі взаємодії було б корисним навести відповідні системи рівнянь та вказати наближення, які були використані при чисельному моделюванні методом крупних частинок.

Зроблені зауваження не є принциповими і не впливають на загальну високу позитивну оцінку дисертації О. О. Лихачова. Наведені зауваження не

впливають на якість, наукову новизну та практичну значимість дисертації. Тому їх можна розглядати як побажання.

### **Висновок щодо відповідності дисертації нормам.**

Вважаю, що дисертаційна робота Лихачова О. О. «Спектральні характеристики та стабільність випромінювання клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів з урахуванням особливостей процесів енергообміну» є завершеною науковою працею, яка містить низку нових, актуальних і достовірних результатів, що свідчать про її складність, систематичність та важливе значення для робіт з розробки джерел ТГц випромінювання з перестроюванням частоти у широких діапазонах. Дисертація повністю відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р., а її автор, Лихачов Олександр Олександрович, заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та Астрономія».

Рецензент

Доктор фіз.-мат. наук, с.н.с,

зав. відділом радіофізики твердого тіла

ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України



Ю. О. Аверков

23.01.2023 р.

Підпис Ю. О. Аверкова засвідчую.

ТВО Вченого секретаря

ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України

кандидат фіз.-мат. наук



О. В. Кривенко