

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Кулешова О.М. “Нові режими автоколивань у низьковольтних електронно-вакуумних приладах міліметрового та субміліметрового діапазонів із перестроюванням частоти”, представленої на здобуття ученого ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.04 – фізична електроніка.

Дисертаційна робота Кулешова О.М. “Нові режими автоколивань у низьковольтних електронно-вакуумних приладах міліметрового та субміліметрового діапазонів із перестроюванням частоти” присвячена теоретичному та експериментальному розгляду важливої наукової проблеми – фізиці різноманітних електронно-хвильових явищ, які супроводжують процес взаємодії електронного потоку з електромагнітним полем в просторово-розвинутих електродинамічних структурах приладів класу мазерів на циклотронному резонансі (МЦР) та генераторів на основі ламп зворотної хвилі О-типу (ЛЗХО) з використанням нахилу стрічкового електронного потоку до поверхні гребінки (клінотроні ефект), принцип роботи яких засновано на індукованому випромінюванні Вавілова-Черенкова.

Необхідно відзначити, що інтерес до створення нових висококогерентних і ефективних джерел електромагнітного випромінювання в міліметровому та субміліметровому діапазонах довжин хвиль не слабшає. Причина цього полягає в тій потенційній ролі, яку розробники апаратури відводять даному діапазону з точки зору розвитку радіоелектронних систем майбутнього. На жаль, особливості міліметрового діапазону, а особливо субміліметрового діапазону, пов'язані, в першу чергу, зі зменшенням робочого об'єму простору взаємодії і, як наслідок цього, появою значних технологічних труднощів (наприклад, вирішення проблеми великих омичних ВЧ втрат, обумовлених грубою обробкою поверхні електродинамічної структури (нерівності більш ніж 10 мкм), а також проблеми отримання в даних умовах щільних електронних потоків та рішення задачі відводу тепла від електродів приладів - все це обмежує можливості класичних приладів вакуумної електроніки - ЛБХО і ЛЗХО, клістронів, магнетронів та інші. В цьому плані комплекс питань, розглянутих в даній дисертаційній роботі, є спроба, з одного боку, узагальнити і систематизувати той величезний багаторічний досвід досліджень, досягнутий науковою школою під керівництвом проф. Єфімова Б.П., а з іншого - запропонувати шляхи подальшого розвитку як існуючих генераторів клінотронного типу та МЦР, так і створення нових механізмів перетворення енергії електронного потоку в енергію НВЧ випромінювання у субміліметровому діапазоні. Рішення поставлених питань проводилося в рамках і тісному зв'язку з науковими програмами НАН України та Міністерства освіти і науки України. Зокрема, це стосувалося таких програм як «Електродинаміка відкритих резонансних систем та періодичних структур з композитних матеріалів; розробка когерентних джерел та вимірювальних пристроїв міліметрового та субміліметрового діапазонів електромагнітних хвиль» (шифр «СТАРТ 2», номер держреєстрації 0107U001082); «Електродинаміка відкритих резонансних систем, періодичних структур із композитними матеріалами та антенних систем; прямі та зворотні задачі; розробка когерентних джерел, елементної бази і вимірювальних пристроїв міліметрового та субміліметрового діапазонів електромагнітних хвиль» (шифр «СТАРТ 3», номер держреєстрації 0111U010480); «Генерація, посилення, детектування та розповсюдження терагерцевого випромінювання; електродинамічне моделювання та експеримент» (шифр «СТАРТ 4», номер держреєстрації 0117U004034); «Нові теоретичні та

експериментальні методи в електродинамічному моделюванні, генерації та випромінюванні електромагнітних хвиль гігагерцового та терагерцового діапазонів частот» (шифр «СТАРТ 5», номер держреєстрації 0120U100980); «Розробка нових методів і засобів отримання інформації про фізичні характеристики природних середовищ, їх структурних неоднорідностей, поверхонь розподілу та окремих об'єктів за даними дистанційного зондування і радіолокації» (шифр «СЕНСОРИКА 2», номер держреєстрації 0118U003035). Підводячи підсумок вищесказаного можна сказати, що дана дисертаційна робота, присвячена встановленню загальних фізичних закономірностей хвильових і електронно-хвильових процесів в приладах з просторово-розвинутими електродинамічними системами класу МЦР та клінотронах представляє безперечний науковий і практичний інтерес, а її актуальність не викликає сумніву.

Дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів основного тексту з рисунками та таблицями, висновків, списку використаних джерел і одного додатка. Загальний обсяг дисертації становить 354 сторінки.

В дисертаційній роботі автором вирішується комплекс завдань, що становлять основу важливої проблеми, присвяченій вивченню фізики електронно-хвильових процесів в електровакуумних приладах міліметрового та субміліметрового діапазонів з просторово-розвинутими електродинамічними структурами. Серед розглянутих питань необхідно відзначити дослідження, які були направлені на підвищення ефективності електронно-хвильових процесів взаємодії щільних стрічкових електронних потоків у клінотронах з несиметричною електронно-оптичною системою в неоднорідному магнітному полі та аналіз енергетичних характеристик черенковського випромінювання в цілому, аналіз хвильових процесів в надрозмірному резонаторі з урахуванням особливостей трансформації НВЧ енергії. Значна увага була приділена питанням стабілізації живлення що дало можливість розширити практичне використання приладів що розроблялися (МЦР та клінотронів). В ході проведених досліджень автором проведена велика робота. До числа нових фізичних результатів дисертаційної роботи можна віднести результати, які стосуються вирішення окремих задач, пов'язаних з:

- вибором розподілу неоднорідного статичного магнітного поля вдовж простору взаємодії клінотрону;
- формуванням електронного потоку з профільованим розподілом електронів за швидкістю;
- використанням унікальних властивостей гібридних об'ємно-поверхневих хвиль в закритому хвилеводі з багатоступеневою гребінкою;
- аналізом додаткового впливу омичних втрат, що виникають, особливо, в субміліметровому діапазоні та обумовлені шорсткістю поверхні електродинамічної системи й осіданням електронного пучка;
- аналізом впливу процесів відбиття та трансформації хвиль у надрозмірному резонаторі на вихідні характеристики клінотрону.
- теоретичними та експериментальними дослідженнями умов збудження генерації в низьковольтних МЦР та створення електронно-оптичної системи, яка включала планарну магнетронно-інжекторну гармату з формування стрічкових гвинтових електронних потоків для дводзеркальних МЦР з перестроюванням частоти в широкому діапазоні.

Особливо слід відмітити цикл досліджень, які пов'язані з використанням методу пропорційно-інтегрально-диференційного управління напругами що живлять електронно-оптичні системи МЦР та клінотронів. Застосування такого підходу до джерела живлення дозволило отримати параметри випромінювання, що їх стабільності, та відповідає вимогам

спектроскопії ДПЯ-ЯМР. Це, в значній мірі, дозволило розширити практичне використання приладів, які розробляються в субміліметровому діапазоні.

Таким чином, сукупність вищезгаданих досліджень та отриманих наукових результатів дозволяє зробити остаточний висновок про їх високий (світовий) рівень та розглядати їх як значний прорив в галузі створення електронно-вакуумних приладів в Україні в терагерцовому діапазоні.

Достовірність і обґрунтованість основних результатів і висновків дисертації забезпечена строгими математичними методами вирішення задач, які реалізовані в самоузгодженій постановці (коди Poisson SuperFish та CST MWS) та в наближенні заданого струму, а також адекватністю фізичних моделей процесам, що відбуваються при збудженні черенковського випромінювання. У більшості випадків вона підтверджується також прямою відповідністю теоретичних і експериментальних результатів, отриманих на експериментальних макетах приладів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні генераторів мм та субмм діапазонів, що знайшли застосування у провідних світових наукових центрах у системах ДПЯ-ЯМР спектроскопії (Far-Infrared Research Center, Університет м. Фукуї, Японія та Інституті протеїнових досліджень Університету м. Осаки, Японія); у системі з дослідження квазіоптичної лінії передачі стеларатора W7-X (Max Planck Institute for Plasma Physics, м. Грайфсвальд, Німеччина) та інших центрах ЄС, США та Китаю. Отримані результати в подальшому дозволять створення генераторів суб-ТГц діапазону з покращеними вихідними характеристиками, що може бути практично застосовано в дослідженнях у біології, медицині, фізиці плазми, системах ТГц бачення, зв'язку та інше. Одночасно отримані результати впроваджені в навчальний процес Харківського національного медичного університету в курсі медичної та біологічної фізики та медичної інформатики.

Основні матеріали і результати дисертаційної роботи досить повно висвітлені в опублікованих 42 наукових працях автора (з котрих 22 статті у профільних наукових журналах та 20 тезах доповідей на міжнародних конференціях). Автореферат повністю відповідає змісту і основним положенням дисертації та оформлений відповідно до існуючих вимог ДАК України.

На жаль, робота не вільна від ряду недоліків, серед яких необхідно відзначити наступні:

1. Перше, на що хотілося б звернути увагу – це не зовсім вдале, на мій погляд, використання в назві дисертації терміну «автоколивання». Даний термін за визначенням акад. О.О. Андронова слід відносити до незгасаючих коливань, які підтримуються за рахунок енергії постійного зовнішнього впливу (наприклад, сили тяжіння як в разі ідеального математичного маятника). У нашому ж випадку ми маємо справу з дією на резонансну систему (резонатор) періодичної зовнішньої дії (сили) з боку модульованого електронного потоку. Тому, в цьому випадку коректно буде говорити про «вимушені коливання» або просто використовувати термін «коливання».
2. Відомі рекомендації, згідно з якими при формулюванні мети дисертаційного дослідження неприпустимо говорити, що «мета роботи – це дослідження ...».
3. Теоретична частина дисертації пов'язана, в основному, із застосуванням прикладних пакетів (або кодів) Poisson SuperFish та CST MWS, що обумовлено складністю процесів електронно-хвильової взаємодії. У той же час робота значно виграла, якби автор більш чітко формулював постановку завдань для чисельного їх вирішення з зазначенням текстової та графічної інформації про використовувані математичні моделі.
4. На жаль в дисертації і авторефераті я не знайшов інформації про застосування результатів дисертаційної роботи в навчальному процесі. Можливо автор не вважав за


потрібне привести цю інформацію з огляду на значний зарубіжний досвід впровадження результатів досліджень.

5. Відповідно до сентенції стародавніх – "errare humanum est" (людині властиво помилятися) неминучим виявилось кілька дрібних неточностей і похибок у тексті автореферату і дисертації.

Проте, зазначені недоліки не зачіпають основних положень і результатів дисертації, не знижують загального позитивного враження від роботи, яка представляє собою закінчену наукову працю, виконана на високому науковому рівні і закладає основу нового наукового напрямку в мікрохвильовій електроніці - дослідження фізики електронно-хвильових процесів в приладах міліметрового та субміліметрового діапазонів (або терагерцового діапазону) з просторово-розвинутими електродинамічними структурами.

В цілому дисертаційна робота Кулешова О.М. "Нові режими автоколивань у низьковольтних електронно-вакуумних приладах міліметрового та субміліметрового діапазонів із перестроюванням частоти" виконана на високому науковому рівні, присвячена вирішенню важливої наукової проблеми, повністю відповідає сучасним вимогам, що пред'являються до докторських дисертацій, а її автор Кулешов О.М. заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 - фізична електроніка.


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

 Г.І. Чурюмов

23.04.21

Підпис проф. Чурюмова Г.І. засвідчую:

Учений секретар Харківського національного  
університету радіоелектроніки

 І.В. Магдаліна

