

## Відгук

офіційного опонента на дисертаційну роботу Кулешова Олексія Миколайовича «Нові режими автоколивань у низьковольтних електронно-вакуумних приладах міліметрового та субміліметрового діапазонів із перестроюванням частоти», представленій до захисту на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 - фізична електроніка

Дисертаційну роботу О.М. Кулешова присвячено дослідженню фізичних механізмів взаємодії нерелятивістських електронних пучків з поверхневими, об'ємними а також гібридними електромагнітними хвилями у надрозмірних електродинамічних структурах з метою розробки компактних широкосмугових низьковольтних електронно-вакуумних приладів (ЕВП) міліметрового та субміліметрового діапазонів. Дисертаційну роботу виконано в межах низки держбюджетних і госпдоговірних науково-дослідних робіт ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України. Головну увагу в роботі приділено двом класам приладів, яким властиві середні рівні потужності та широкі діапазони частот у міліметровому та субміліметровому діапазонах довжин хвиль, а саме, клинотронам і мазерам на циклотронному резонансі.

*Актуальність теми* обумовлено важливим місцем таких ЕВП у численних технологічних застосуваннях, зокрема, в субміліметровій спектроскопії діелектричних і біологічних матеріалів, системах терагерцового бачення, діагностиці плазми, системах зв'язку та радіолокації, а також у багатьох інших. Наприклад, для підвищення чутливості ядерного магнітно-резонансного (ЯМР) спектрального аналізу біологічних і медичних матеріалів на основі динамічної поляризації ядер (ДПЯ), необхідні джерела випромінювання в діапазоні частот 140-800 ГГц, яким властиві достатні рівні вихідної потужності в широких діапазонах частот. Таким чином, актуальність теми дисертації Кулешова О.М. не викликає сумніву.

*Наукова новизна* результатів, що отримано у дисертації, полягає в наступному:

1. Вперше продемонстровано підвищення ефективності взаємодії електромагнітних хвиль субміліметрового діапазону в клинотронах з профільованими за швидкістю електронними потоками:

а. показано, що розподіл поздовжніх швидкостей електронів пучка, що виникає в несиметричній електронно-оптичній системі, істотно впливає на ефективність електронно-хвильової взаємодії в клинотронах субмм діапазону: завдяки залежності оптимального розсинхронізму від амплітуди ВЧ поля, вихідна потужність клинотронів

зростає у разі спадаючого розподілу швидкостей електронів пучка у порівнянні з моноенергетичним потоком та різко падає у протилежному разі;

б. знайдено умови виникнення багаточастотного режиму генерації в клинотроні з несиметричною електронно-оптичною системою.

2. Вперше визначено розподіл неоднорідного магнітного поля вздовж простору взаємодії клинотрона, що збільшує довжину траєкторій електронів пучка у шарі ефективного високочастотного поля. За результатами розрахунків створено магнітні фокусувальні системи та експериментально отримано генерацію в клинотронах субмм діапазону зі зменшеними значеннями стартового струму.

3. Вперше теоретично та експериментально знайдено режим гібридних об'ємно-поверхневих хвиль у закритому хвилеводі з багатоступеневою гребінкою, що мають унікальні властивості:

а. показано існування міжтипової взаємодії об'ємно-поверхневих мод у закритому хвилеводі з багатоступеневою гребінкою;

б. отримано генерацію на об'ємно-поверхневій хвилі з позитивною груповою швидкістю за відсутності провалів потужності в широкому діапазоні частот за наявності гістерезису по напрузі.

4. Вперше розглянуто вплив додаткових омичних втрат, що викликані шорсткістю поверхні електродинамічної системи й осіданням електронного пучка на гребінку на електронно-хвильову взаємодію у клинотронах субмм діапазону. Показано, що порівняно з імпульсним режимом у постійному клинотронному режимі розігрівання гребінки електронним потоком призводить до зменшення швидкості зростання вихідної потужності з електронним струмом.

5. Вперше проаналізовано вплив відбиття та трансформації хвиль у надрозмірному резонаторі на вихідні характеристики клинотрона:

а. показано, що трансформація поверхневої хвилі в об'ємну спричиняє резонансний характер генерації в субмм клинотронах із великими омичними втратами;

б. показано, що за допомогою короткозамикаючого поршня в області колектора або інших параметрів системи можна управляти перерозподілом енергії, що поширюється у вихідний хвилевід і анодну апертуру гармати та відбивається у простір взаємодії.

6. Теоретично та експериментально знайдено умови збудження генерації в низьковольтних мазерах на циклотронному резонансі:

a. вперше в МЦР у слабонеоднорідному магнітному полі експериментально отримано генерацію, що збуджується низьковольтним полігвинтовим електронним пучком;

b. вперше експериментально отримано ефективну генерацію в гіротроні з двома низьковольтними гвинтовими електронними пучками у діапазоні частот 300-400 ГГц.

7. Вперше запропоновано електронно-оптичну систему з формування стрічкових гвинтових електронних потоків для дводзеркальних МЦР з перестроюванням частоти генерації в широкому діапазоні. Розраховано та виготовлено планарні магнетронно-інжекторні гармати (МІГ); за допомогою моделювання й експериментально отримано та проведено транспортування в планарному та конфокальному резонаторах широких стрічкових гвинтових електронних потоків із параметрами, які дали можливість отримати ефективну генерацію в широкій смузі частот.

8. З використанням методу пропорційно-інтегрально-диференційного управління напругами, що живлять електронно-оптичні системи вакуумних електронних приладів типу гіротрон та клинотрон, вперше отримано параметри випромінювання, що відповідають вимогам спектроскопії ДПЯ-ЯМР. Запропоновано та практично реалізовано стабілізацію параметрів випромінювання гіротронів з триелектродною МІГ за допомогою двоконтурного методу пропорційно-інтегро-диференційного управління струмом і пітч-фактором пучка, що дало можливість отримати нестабільність потужності генерації менше 0,1% у гіротронах для ДПЯ ЯМР спектроскопії з безперервною тривалістю експериментів більше 30 годин.

*Практичне та теоретичне значення здобутих 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); у системі з дослідження квазіоптичної лінії передачі стелларатора W7-X (Max Plank Institute for Plasma Physics, м. Грайфсвальд, Німеччина) та інших центрах ЕС, США та Китаю.

У подальшому здобуті результати дадуть можливість створити генератори суб-ТГц діапазону з покращеними вихідними характеристиками.

Унаслідок досліджень нових режимів взаємодії гвинтових електронних потоків в МЦР вдалося ефективно збудити коливання у гіротроні у низьковольтному діапазоні

напрут, що відкриває перспективи створення компактних гіротронів з широким діапазоном перестроювання частоти для багатьох практичних застосувань.

**Рівень обґрунтованості.** Вірогідність наукових результатів та обґрунтованість положень і висновків дисертаційної роботи Кулешова О.М. обумовлена використанням достатньо добре випробуваних експериментальних методів. Наведені в дисертації результати теоретичних розрахунків добре узгоджуються з експериментальними даними. Низка висновків та оцінок у граничних випадках відповідають експериментальним та числовим результатам, які були здобуті раніше іншими авторами. Усі здобуті результати відповідають загальним положенням сучасної фізичної та плазмової електроніки, а також і фізики пучків заряджених частинок.

**Основні наукові публікації.** За результатами дослідження опубліковано 22 наукові статті: 8 статей у фахових виданнях України, 14 статей у іноземних фахових виданнях. Перераховані публікації достатньо повно відображають запропоновані в дисертації теоретичні та практичні рішення. Наведені публікації відповідають темі дисертації та повно відображають її зміст. Особистий внесок дисертанта в роботи, виконані зі співавторами, точно і детально відображений у дисертації та авторефераті. Якість публікацій підтверджує індекс Хірша в наукометричній базі Scopus  $h=9$ , число цитувань 346.

**Структура та зміст дисертації.** Повний обсяг дисертації становить 354 сторінки. Текст дисертації складається з анотації, вступу, шести розділів основного тексту з 122 рисунками та 10 таблицями, висновків, одного додатку і списку літератури з 369 джерел.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету і завдання роботи, показаний зв'язок із науковими програмами і НДР, проведеними в ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАНУ, розкрито наукову новизну здобутих результатів і дано оцінку їх практичної цінності.

У першому розділі роботи вміщено ґрунтовний огляд результатів досліджень з розробки компактних ефективних електронно-вакуумних генераторів електромагнітного випромінювання міліметрового та субміліметрового діапазонів. Проведений аналіз дав підставу зробити висновок, що ЕВП, принцип дії яких базується на випромінюванні Вавілова-Черенкова, характеризуються найширшими діапазонами перестроювання частоти, проте доволі малою ефективністю у короткохвильовій частині міліметрового та у субмм діапазонів.

\*У *другому розділі* дисертаційної роботи наведені результати досліджень з формування та транспортування густих стрічкових потоків у клинотронах з несиметричною електронно-оптичною системою (ЕОС) в магнітних полях зі слабкою неоднорідністю. У розділі описано ЕОС та магнітні системи, що фокусують пучки, (МФС) клинотронів мм та субмм діапазонів. Основну увагу приділено формуванню стрічкових електронних потоків з оптимальними параметрами для підвищення ефективності електронно-хвильової взаємодії в електродинамічній системі клинотронів.

У *третьому розділі* дисертаційної роботи детально розглянуто вплив омичних втрат, а також відбиття та трансформації мод у надрозмірних резонаторах клинотронів на вихідні характеристики генераторів. У конструкції клинотрону на відміну від лампи зворотної хвилі немає поглинача в області колектору, що зумовлює резонансну залежність вихідної потужності від частоти клинотронів мм діапазону завдяки відбиттям поверхневої хвилі від неоднорідностей на кінцях гребінки. У субмм діапазоні омичні втрати поверхневої хвилі суттєво зростають із збільшенням частоти, що спричиняє зменшення впливу відбиття поверхневої хвилі та істотне зниження рівнів вихідної потужності клинотронів.

У *розділі чотири* представлені результати досліджень механізму зворотного зв'язку на об'ємно-поверхневих хвилях, що збуджуються в резонаторі клинотрону з неоднорідною системою, що сповільнює поширення хвилі. Такий режим роботи запропоновано автором з метою зниження впливу високочастотних омичних втрат та підвищення ефективності електронно-хвильової взаємодії в приладах, заснованих на випромінюванні Вавилова-Черенкова.

*Розділ п'ять* присвячений питанню підвищення ефективності взаємодії та діапазону перестроювання частоти у низьковольтних мазерах на циклотронному резонансі (МЦР). Зокрема, наведено результати досліджень низьковольтної генерації в МЦР з адіабатичною магнетронно-інжекторною гарматою (МІГ) та відкритим резонатором у формі відрізка циліндричного хвилевода зі звуженнями на кінцях. Унаслідок траєкторного аналізу в кодах EGUN та CST PS було розроблено МІГ з кутом нахилу катода  $18^\circ$  відносно осі системи та досліджено енергетичні параметри сформованого гвинтового електронного пучка (ГЕП) з прикордонною топологією. Крім того, експериментально досліджено низьковольтний режим роботи двопучкового гіротрона на фундаментальній циклотронній гармоніці у діапазоні частот 300-400 ГГц, а також проведено дослідження формування стрічкового ГЕП з величиною пітч-фактора

більше одиниці для дводзеркального МЦР з перестроюванням частоти генерації в широкому діапазоні. Оптимізацію геометрії МІГ з планарною геометрією для 75 ГГц планарного гіротрона проведено з використанням тривимірного чисельного моделювання в кодї CST PS.

*Розділ шість* присвячений дослідженням стабілізації та контролю параметрів випромінювання електронно-вакуумних приладів з використанням зовнішніх багатоконтурних пропорційно-інтегро-диференційний (ПІД) регуляторів для практичних застосувань, зокрема, у ЯМР-ДПЯ спектроскопії. Зокрема, проаналізовано фактори, що впливають на стабільність параметрів випромінювання та на ширину спектральної лінії клинотронів та гіротронів мм і субмм діапазонів, існуючі методи стабілізації. Крім того, наведені результати з розробки схеми стабілізації параметрів випромінювання клинотронів мм та субмм за допомогою ПІД управління напругами, що живлять ЕОС приладів; результати експериментального дослідження стабільності частоти та потужності випромінювання клинотронів діапазонів 130-400 ГГц для ДПЯ ЯМР спектроскопії; продемонстровано збільшення ширини спектральної лінії до 15 МГц у разі пульсацій напруги пучка 700 мВ у клинотроні на частоті 205,9 ГГц, у той час як в 300 ГГц клинотроні пульсації прискорювальної напруги на рівні 2,8 В збільшували ширину спектральної лінії випромінювання до 100 МГц. У цьому розділі також наведено результати стабілізації вихідних характеристик гіротронів з триелектродною МІГ для ДПЯ ЯМР спектроскопії.

У *Висновку* дисертаційної роботи узагальнено результати проведених експериментальних і теоретичних досліджень і сформульовані основні висновки.

У *Додатку А* наведений список публікацій здобувача за темою дисертації.

### ***Основні результати дисертаційної роботи***

До головних достоїнств даної роботи, передовсім, слід віднести те, що дисертація має яскраво виражений комплексний характер і вдало об'єднує фундаментальні та прикладні аспекти. Вона також гармонічно поєднує в собі результати як експериментальних досліджень, так і теоретичних розрахунків, що виконані автором.

Автором дисертаційної роботи здобуто оригінальні наукові результати, які роблять істотний внесок у розуміння фізики процесів, пов'язаних із підвищенням ефективності електронно-хвильової взаємодії та стабільності вихідних характеристик компактних низьковольтних електронно-вакуумних приладів з перестроюванням частоти

міліметрового та субмм діапазонів. Було розроблено системи міліметрового та субміліметрового діапазонів на основі клинотронів і гіротронів для досліджень біологічних об'єктів за допомогою ДПЯ ЯМР спектроскопії, для юстування квазіоптичної лінії стеларатора W7-X та для інших практичних застосувань. Результати досліджень можуть зробити істотний вплив в розробці радіолокаційних систем, систем зв'язку з підвищеною швидкістю передачі даних, системах діагностики плазми, в системах аналізу біологічних і медичних об'єктів, матеріалознавстві та багатьох інших.

Серед здобутих результатів, на мою думку, особливо слід відзначити таке:

- розроблено магніто-фокусувальну систему з таким розподілом неоднорідного магнітного поля вздовж простору взаємодії клинотрону, що збільшує довжину траєкторій електронів пучка у шарі ефективного високочастотного поля, що дало можливість підвищити коефіцієнт виходу пакетованих клинотронів мм та субмм діапазонів;
- експериментально отримано генерацію гібридних коливань багатосходинкової гребінки та коливань базової односходинкової гребінки в об'ємному резонаторі з багатосходинковою плоскою гребінкою;
- експериментально отримано генерацію електромагнітного випромінювання в низьковольтному МЦР з циліндричним резонатором в слабо неоднорідному магнітному полі;
- вперше отримано ефективну низьковольтну генерацію двопучкового гіротрона в діапазоні робочих частот 300-400 ГГц;
- отримано генерацію з потужністю 60 Вт на частоті 400 ГГц у гіротроні з прискорювальною напругою 5.4 кВ, у той час як мінімальна напруга генерації склала 2.4 кВ, що добре узгоджується з моделюванням;
- вперше експериментально сформовано стрічковий ГЕП з шириною 10 мм та мінімальними спотвореннями профіля пучка в області однорідного магнітного поля з пітч-фактором 1.1, розкидом обертальної компоненти швидкості електронів 10%, повздовжньої 14% з напругою 5кВ та струмом пучка до 300мА;
- отримано залежності ширини спектральної лінії клинотронів субмм діапазону від пульсацій напруги, що прискорює, та визначено діапазон пульсацій напруги джерела живлення клинотрону, що забезпечує ширину спектральної лінії та потужність генерації, необхідні у ЯМР спектроскопії з динамічною поляризацією ядер;

- вперше запропоновано та реалізовано стабілізацію параметрів випромінювання гіротронів з три-електродною МІГ за допомогою двоконтурного методу ПД управління струмом та підч-фактором пучка, що дало можливість отримати нестабільність потужності генерації менше 0,1% у гіротронах для ДПЯ ЯМР спектроскопії з безпервною тривалістю експериментів більше 30 годин.

Слід підкреслити, що результати дисертаційної роботи здобуті в межах чітко поставлених задач із застосуванням адекватних засобів досліджень. Усі розділи є взаємопов'язаними та спрямованими на вирішення поставленої проблеми та задач дисертації.

***Разом із безперечно вагомими здобутками та важливими фізичними результатами робота має і деякі недоліки, серед яких слід зауважити наступне:***

1. Висновок 5 а) на с. 28 сформульовано так, що незрозуміло, чи то «трансформація поверхневої хвилі в об'ємну» спричиняє резонансного характеру генерації, чи то спричиняє великі омічні втрати в субмм клинотронах.

2. На переважній більшості рисунків, що відображають експериментальні результати, відсутні довірчі інтервали, та не обговорюються похибки вимірювань, які для аналізу деяких отриманих результатів є принциповими.

3. Більшість наступних зауважень стосуються тексту та оформлення дисертації. Вони, однак, не заважають розумінню фізичного змісту роботи. Зокрема, у Вступі до першого розділу на с. 35 вказано, що «Робота на гармоніках циклотронної частоти дозволяє підвищити частоту генерації МЦР в  $n$  раз». Напевне, йдеться про збільшення частоти в  $n$  разів.

4. У підрозділі 1.2. на підтвердження того, що «Випромінювання Вавилова-Черенкова виникає під час руху зарядженої частинки в середовищі, в якій фазова швидкість поширення електромагнітної хвилі порівняна зі швидкістю руху зарядженої частинки [28].» наведено посилання на матеріали конференції [A. N. Kuleshov, S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, V. V. Zavertanniy, E. M. Khutoryan, B. P. Yefimov, Sub-THz CW Clinotron Oscillators with Increased Output Power / IEEE International Vacuum Electronics Conference: int. conf., 22 – 24 apr. 2014; conf. proc. – Monterey, 2014. – P. 73-74.].

5. На окремих рисунках залишились написи англійською мовою.

6. Замість слова «спротив» слід було застосовувати «опір».



7. В анотації на с. 3 присутні дві друкарські помилки у виразі з п'яти слів: «очіданням електронного потоку на грубінку».

*Разом із тим, наведені зауваження не стосуються основних положень, що виносяться на захист, не можуть вплинути на загальну високу оцінку дисертаційної роботи та не змінюють позитивної думки про наукову обґрунтованість і вірогідність положень і висновків дисертації.*

Наведені зауваження також не ставлять під сумнів достовірність та цінність здобутих у дисертації результатів, а скоріше свідчать про доцільність подальших експериментальних та теоретичних досліджень взаємодії нерелятивістських електронних пучків з електромагнітними хвилями у надрозмірних електродинамічних структурах задля розробки компактних широкосмугових низьковольтних електронно-вакуумних приладів міліметрового та субміліметрового діапазонів.

***Відповідність дисертації встановленим вимогам та оцінка в цілому:***

Таким чином, ґрунтуючись на приведеній вище оцінці дисертаційної роботи, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Кулешова О.М. виконана на високому науковому рівні та є завершеною науковою працею. В ній здобуто нові наукові результати, що розв'язують актуальну проблему створення компактних широкосмугових низьковольтних електронно-вакуумних приладів міліметрового та субміліметрового діапазонів, яким властиві середні рівні потужності та широкі діапазони частот у міліметровому та субміліметровому діапазонах довжин хвиль, а саме, клинотронам і мазерам на циклотронному резонансі.

Дисертаційна робота та автореферат написані грамотною науковою мовою та містять чітке формулювання поставленої задачі та висновків. В авторефераті повністю розкрито основні результати й положення, що виносяться на захист, і вірно відображено зміст дисертаційної роботи.

В цілому, треба відзначити, що дисертаційна робота О.М. Кулешова суттєво доповнює сучасні уявлення про фізичні механізми взаємодії нерелятивістських електронних пучків із електромагнітними хвилями у надрозмірних електродинамічних структурах у міліметровому та субміліметровому діапазонах.

Вважаю, що дисертаційна робота Кулешова О. М. «Нові режими автоколивань у низьковольтних електронно-вакуумних приладах міліметрового та субміліметрового діапазонів із перестроюванням частоти» повністю відповідає всім вимогам Атестаційної

колегії МОН України до докторських дисертацій, а її автор, безперечно, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 - фізична електроніка.

Офіційний опонент,  
директор навально-наукового інституту  
«Фізико-технічний факультет»  
Харківського національного університету  
імені В. Н. Каразіна,  
член-кореспондент НАН України,  
доктор фізико-математичних наук, професор

22.04.21

Ігор ГІРКА

Підпис засвідчую  
Начальник служби управління  
персоналом

