

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Максименка Олександра Володимировича  
«ВЗАЄМОДІЯ ГВИНТОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ  
ПОЛЯМИ В РЕЗОНАТОРАХ ГІРОТРОНІВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ»  
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за  
спеціальністю 01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок

Дисертаційна робота Максименка О.В. присвячена теоретичному дослідженню взаємодії гвинтових електронних пучків з електромагнітними полями в резонаторах гіротронів терагерцового діапазону, розробці нових методів розрахунку такої взаємодії з урахуванням конверсії мод та омічних втрат, а також визначенню впливу конверсії мод на основні параметри роботи вказаних гіротронів.

**Актуальність.** Взаємодія пучків заряджених частинок з електромагнітними полями є ключовим процесом в фізиці плазми, в радіофізиці, в фізичній електроніці. Цей процес є основою функціонування багатьох вакуумних генераторів електромагнітного випромінювання. Серед таких пристроїв, які мають видатні характеристики, зокрема рекордну потужність та ефективність, є гіротрони. Це визначило їх безальтернативне використання в установках керованого термоядерного синтезу. Поява потужних магнітів імпульсного та неперервного режиму роботи дозволила підвищити робочу частоту гіротронів аж до терагерцового діапазону та розширити область їх застосування. Надзвичайні властивості та численні застосування терагерцового випромінювання посприяли інтенсивному розвитку терагерцових гіротронів. Перешкодою на шляху подальшого підвищення частоти гіротронів стала необхідність забезпечення великих значень індукції магнітних полів. Розв'язати проблему можна вибором вищих циклотронних гармонік у якості робочої моди гіротронів. Це дозволяє зменшити значення необхідного магнітного поля обернено пропорційно до номеру обраної гармоніки. Недоліком такого методу є загострення проблеми конкуренції з боку нижчих гармонік. Таким чином постає проблема пошуку ефективних методів селекції мод. Електродинамічна селекція мод полягає у профілюванні резонатору гіротрона, з метою покращення умов збудження робочої моди, або їх погіршення для паразитних гармонік. Це призвело до появи нових типів резонаторів зі значними неоднорідностями профілю. Як відомо, на неоднорідностях відбувається конверсія робочої моди в її радіальні сателіти. Саме явище відомо достатньо давно, проте його вплив на робочі параметри гіротронів, зокрема терагерцового діапазону, залишається невивченим. З підвищенням частоти зростають також омічні втрати. В терагерцовому діапазоні вони становлять більшу частку від загальних втрат. Дисертаційна робота присвячена вивченню впливу омічних втрат та конверсії мод на основні параметри терагерцових гіротронів. Тому можна вважати, що вибрана тема дисертаційної роботи є актуальною.

**Обґрунтованість і достовірність** наукових положень і висновків дисертації зумовлюється такими фактами:

Використанням для рішення задач стандартних методів фізики пучків заряджених частинок, аналітичних методів теоретичної фізики та методів чисельного розв'язання звичайних диференціальних рівнянь; відповідністю отриманих результатів в деяких граничних випадках з результатами інших авторів; аналізом збіжності запропонованих методів; контролем точності програмного забезпечення, яке використовувалося для проведення чисельних досліджень; в усіх випадках, коли це було можливим, дисертант здобув відомі граничні результати; в багатьох важливих випадках дисертанту вдалося описати процес на якісному рівні, який добре описує здобуті результати; здобуті результати є фізично прозорими та не суперечать фізичним уявленням про процеси, які вивчаються; результати чисельних розрахунків підтверджують аналітичні висновки; одержані аналітичні та чисельні результати в граничних випадках співпадають з результатами інших авторів; результати дисертаційної роботи опубліковані у вітчизняних та зарубіжних виданнях, а також докладалися на міжнародних симпозіумах та конференціях.

**Значущість для науки і практики** дисертаційної роботи обумовлена тим, що в ній розглянуті важливі сторони взаємодії пучків заряджених частинок з електромагнітними полями в резонаторах терагерцових гіротронів. Здобуті в дисертаційній роботі результати дозволили дисертанту запропонувати метод селекції мод на основі синусоїдально гофрованого резонатора, оцінити вплив омичних втрат та конверсії мод на основні параметри терагерцових гіротронів, продемонструвати важливість точності обробки резонатора гіротрона з трансформацією мод.

Найбільш цікаві та важливі наукові результати, що викладені в дисертації, коротко можна сформулювати таким чином:

- У другому розділі вивчаються дисперсійні характеристики циліндричного резонатора з азимутальним синусоїдальним гофром з парною кількістю гофрів. На основі збіжності нескінченного визначника, а також шляхом чисельних розрахунків дисертант показав появу смуг непропускання в такому резонаторі. Аналіз дисперсійного рівняння дозволив отримати обмежену алгебраїчну форму, з якої випливають характеристики цих смуг. Цей результат може бути корисний в методах селекції коливань в резонаторах терагерцових гіротронів. Зокрема, при боротьбі з конкуренцією мод.
- Третій розділ є найбільшим та, напевно, з найцікавішими результатами. Зокрема, в цьому розділі запропоновано два нових метода обчислення параметрів власних коливань резонаторів терагерцових гіротронів з урахуванням конверсії мод та омичних втрат. На прикладі гіротрона FU CW III обома методами досліджено вплив конверсії мод та омичних втрат на добротності та власну частоту його резонатора. Зокрема, знайдена точність оцінювальної формули для омичної добротності. Дисертантом продемонстровано появу, за рахунок конверсії мод, спіралеподібних структур електромагнітного поля у вихідному перерізі цього гіротрона.

Це є дуже важливим результатом, оскільки знання точної структури вихідного поля необхідне для оптимального використання випромінювання гіротрона.

- Четвертий розділ присвячений вивченню стартових параметрів терагерцових гіротронів з урахуванням конверсії мод та омічних втрат. В рамках наближення заданого поля була отримана формула для стартового струму гіротрона з урахуванням конверсії мод. Цей результат є дуже важливим в задачах оптимізації параметрів гіротрону при подоланні проблеми конкуренції мод. Використовуючи отриману формулу, в розділі досліджено вплив конверсії на стартові струми гіротрона FU CW III та гіротрона з трансформацією мод. Проведені в розділі дослідження дозволили зробити висновок про критичний вплив похибки у виготовленні резонатора гіротрона з трансформацією мод на його стартовий струм. Для знаходження більш точних значень стартових параметрів терагерцових гіротронів розвинутий самоузгоджений підхід, який враховує омічні втрати та конверсію мод. В рамках цього підходу досліджено вплив конверсії мод на стартовий струм та стартову частоту гіротрона FU CW III. Виявлено утворення спіралеподібних структур електромагнітного поля у вихідному перерізі резонатора гіротрона. Вперше продемонстрований вигляд амплітуд вимушених коливань гіротрона з урахуванням конверсії мод для значень магнітного поля між аксіальними резонансами.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у наступному:

1. Перш за все, слід відзначити, що в дисертаційній роботі наведено значну кількість нових методів розрахунку терагерцових гіротронів з урахуванням конверсії мод та омічних втрат. Більш того, методи обчислення характеристик холодних резонаторів терагерцових гіротронів дозволяють їх використовувати для виявлення електродинамічних властивостей власних коливань хвилеводів інших типів приладів.
2. Важливими також є виявлення смуг непропускання, що може використовуватись в електродинамічних методах селекції мод, зокрема при подоланні конкуренції мод.
3. Важливим для комплексів, частиною яких виступають терагерцові гіротрони, є виявлення спіралеподібних структур вихідного електромагнітного випромінювання гіротрона. Більш точне визначення структури електромагнітного поля гіротрона дозволить підвищити ефективність таких комплексів.

Дисертаційна робота багата здобутими результатами. Однак в ній є недоліки. Відзначимо головні:

- У другому розділі проведено розрахунки дисперсійних характеристик резонаторів з синусоїдальним азимутальним гофром. Однак для повноти розгляду власних режимів таких резонаторів доцільно було б також представити просторові розподіли полів різних мод.
- У третьому розділі не дуже вдало здійснено представлення результатів. Наприклад, в підрозділі 3.2 наведено лише два рисунки, що

представляють електродинамічні характеристики резонатора, а в той же час вісім рисунків ілюструють аналіз збіжності добротності та власної частоти. В підрозділі 3.3 аналіз результатів, представлених на рис. 3.15-3.18 зведений практично до одного речення. Також не отримав фізичного пояснення дуже цікавий результат — формування спіралеподібного розподілу поля на виході резонатора гіротрона.

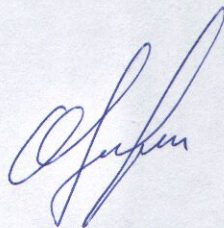
- На мою думку, в роботі занадто вільно вживається термін «самоузгодженість». Він використовується навіть відносно до омічних втрат. Разом з тим, в тексті дисертації відсутні пояснення смислу цього терміну при застосуванні у незвичному контексті.

Звісно, відзначені недоліки дещо погіршують загальне враження від роботи, але не стосуються принципових моментів і не зменшують значення здобутих в дисертації наукових результатів. Наукові результати, положення, висновки і рекомендації, сформульовані в дисертації, викладені в 6-ох статтях, опублікованих у фахових виданнях і пройшли апробацію на 9-ти міжнародних науково-технічних конференціях. Зміст автореферату правильно і повністю відображає основні положення дисертації. За своїм змістом дисертаційна робота повністю відповідає спеціальності 01.04.20 – "Фізика пучків заряджених частинок".

На підставі вищевикладеного можна стверджувати, що дисертаційна робота Максименка Олександра Володимировича «Взаємодія гвинтових електронних пучків з електромагнітними полями в резонаторах гіротронів терагерцового діапазону» повністю задовольняє вимогам ДАК МОН України до кандидатських дисертацій, зокрема, пп. 9, 11-13 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.20 – «Фізика пучків заряджених частинок».

#### Офіційний опонент

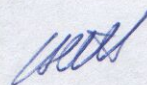
Доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
професор кафедри фізичних основ  
електронної техніки Харківського  
національного університету  
радіоелектроніки



Одаренко Є. М.

Підпис Одаренка Є. М. засвідчую

Учений секретар ХНУРЕ  
канд. техн. наук, доцент



Магдаліна І. В.