

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Лобзова Леоніда Дмитровича "Стабілізація збуджуваних ВЧ-полів у Н-резонаторі лінійного прискорювача іонів в умовах мультипакторних явищ", яку представлено на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

Актуальність теми. Фактично серед процесів роботи будь-якого мікрохвильового приладу, а тим більше – будь-якої системи, присутні резонансні процеси. Як правило, такі процеси мають позитивний характер. На жаль, в роботі деяких приладів виявляються і небажані резонансні процеси, які можуть призводити до їх функціональної непридатності. Наприклад, до них відноситься процес взаємодії електронів з ВЧ-полем, при якому електрони осцилюють синхронно з ВЧ-полем, яке накладено між електродами. При цьому вторинні електрони, що з'являються в результаті зіткнень первинних електронів з електродами, поповнюють кількість осцилюючих електронів, яка збільшується з часом. Дійсно, первинні електрони, що вийшли з електрода, коли він був катодом, прискорюються ВЧ-напругою і, потрапляючи на протилежний електрод, викликають вторинну електронну емісію. Так як час прольоту первинних електронів є близьким до півперіоду ВЧ-напруги, то вторинні електрони, що вилетіли з другого електрода, який до цього часу став катодом, також прискорюються і викликають вторинну емісію вже з першого електрода. При коефіцієнті вторинної емісії більше одиниці такий взаємний обмін призводить до появи струму між електродами. В результаті між електродами виникає вторинно-електронний резонансний розряд — мультипакція. Мультипакторні ефекти можуть виникати у резонаторах або зазорах трубок дрейфу лінійних прискорювачів заряджених частинок, у хвилеводних структурах, особливо, в вузлах виведення електромагнітної енергії. Звичайно, задача про придушення мультипакторних явищ в мікрохвильових приладах, елементах і системах є першоважливою і актуальною.

Дисертація Лобзова Л.Д. присвячена: 1) дослідженню процесів впливу мультипакторних явищ на працездатність лінійного прискорювача іонів (ЛПІ); 2) розробці концепції придушення мультипакторних ефектів у резонаторах прискорювально-транспортної системи прискорювача на схемному рівні; 3) стабілізації аксіально-однорідних ВЧ-полів у зазорах між трубками дрейфу. **Об'єктом досліджень** є електромагнітні процеси в Н-резонаторі малогабаритного лінійного прискорювача протонів і дейтронів (МЛПД-3) в умовах мультипакторних явищ. Процеси взаємодії електронів вторинної емісії з ВЧ-полем у зазорі між трубками дрейфу ЛПІ дисертант зіставив з процесами в плоскому конденсаторі, який включений до резонансного контуру, що зашунтований опором мультипакторного розряду, тріодного автогенератора з індуктивним зворотним зв'язком. Реалізований спосіб придушення мультипакторних розрядів у ЛПІ дозволив збільшити на порядок значення струму пучка протонів або дейтронів.

У світлі сказаного, тема дисертаційної роботи Лобзова Л.Д. є актуальною як у теоретичному, так і прикладному відношенні. **Мета роботи** полягає в об-

грунтуванні генераторної ВЧ-системи, в якій забезпечується стабілізація аксіально-симетричних ВЧ-полів, що формуються між торцями трубок дрейфу ЛПІ, а також у придушенні мультипакторних явищ. Додатковим підтвердженням актуальності теми є входження обраної тематики в наукові програми НАН України, які схвалено постановами Бюро відділення ядерної фізики та енергетики. Як впливає з матеріалів дисертації, вона виконана в рамках двох держбюджетних тем, що виконуються в ННЦ "ХФТІ" НАН України в період 2011–2020 рр.

Обґрунтованість наукових положень дисертації впливає з того, що вони базуються на результатах кількісного і якісного аналізу адекватних радіотехнічних моделей резонаторних структур, в яких мають місце явища вторинної електронної емісії. Ці моделі побудовано на основі еквівалентних схем заміщення лінійного прискорювача іонів та його вузлів, що враховують фізичні та геометричні параметри середовищ і елементів системи транспортування (дрейфу) іонного пучка.

Теоретичні дослідження базуються на теорії кіл аналогової схемотехніки. При цьому генераторна ВЧ-система промодельована найпростішим ламповим автогенератором з індуктивним зворотним зв'язком. Резонаторний вузол камери дрейфу іонів представлено резонансним контуром, ємність якого моделює діодний проміжок. Електроди діода, прообразом яких є торці трубок дрейфу прискорювача, виконують роль емітерів електронів вторинної емісії. Діодний проміжок зашунтовано активним опором, що є аналогом мультипакторного розряду.

Експериментальні дослідження базуються на вимірюванні ВЧ-напруг і струмів у колах МЛПД-3.

Достовірність отриманих кількісних результатів і якісних висновків обумовлено:

- обґрунтованістю ВЧ-системи, в якій здійснено управління мультипакторними процесами і розрядами в Н-резонаторі ЛПІ;
 - використанням добре апробованих радіотехнічних методів аналізу електронних пристроїв;
 - добрим збігом умов мінімальних енергій електронів вторинної емісії щодо фаз ВЧ-коливань полів, що отримані теоретично, і умов множення електронів за межами їх найменших значень енергій, що отримані експериментально;
 - використанням добре відомих і перевірених експериментальних методів діагностики високочастотних електромагнітних полів резонаторів і електронних пучків вторинної емісії;
 - технічними можливостями вимірювальних пристроїв, що застосовуються.
- Всі нові результати добре обґрунтовано за допомогою фундаментальних принципів фізики.

Наукова новизна результатів і висновків дисертації полягає у наступному:

1. Набула подальший розвиток модель прискорюючого діодного проміжку у вигляді плоского конденсатора, що зашунтований опором мільтипакторного розряду, в складі резонансного контуру лампового автогенератора з індуктивним зворотним зв'язком. Модель дозволила визначити енергію електронів,

при якій виникають процеси лавиноподібної вторинної емісії між торцями трубок дрейфу іонів (протонів або дейтронів) у лінійному прискорювачі.

2. Здійснено стабілізацію аксіально-симетричних ВЧ-полів в Н-резонаторі МЛПД-3 в умовах мультипакторних явищ за допомогою автоколивальної системи, в якій реалізовано два позитивні зворотні зв'язки. Один зворотний зв'язок утворено відведенням енергії власних ВЧ-коливань резонатора, а інший — енергії коливань самого автогенератора системи.

Наукова і практична значущість роботи полягає в тому, що в ній вирішено задачу стабілізації аксіально-симетричних полів між торцями трубок дрейфу прискорювально-транспортної системи МЛПД-3 за рахунок одночасного використання його резонаторної камери як навантаження автогенератора на качування, так і елемента його кола частотно-залежного зворотного зв'язку. При цьому в автогенераторі передбачено додатковий зворотний зв'язок, що охоплює безпосередньо підсилювальний канал автогенератора. На основі побудованої радіотехнічної моделі резонаторно-дрейфового вузла ЛПП промодельовані процеси вторинної емісії електронів з торців трубок дрейфу. В результаті визначено умови придушення мультипакторних явищ в прискорювально-транспортній системі ЛПП. Оригінальність та корисність деяких результатів, що отримані в цьому напрямку, підтверджено незалежними експертами. На основі досліджень, що проведені дисертантом, запропоновано прискорюючу систему ЛПП і високочастотний автогенератор, які захищені двома авторськими свідоцтвами і одним авторським свідоцтвом-патентом СРСР в 1986 р., 1989 р. і 1991 році відповідно (що впливає зі списку опублікованих автором праць за темою дисертації). Узагальнені результати дисертації розширюють фізичні можливості компактних ЛПП і дозволяють вдосконалити сучасну ВЧ-техніку, яка заснована на процесах прискорення заряджених частинок. Варто зазначити, що вони, особливо, знайдуть широке впровадження в розробках міжкаскадних зв'язків ВЧ- та НВЧ-вузлів, які входять складовими частинами в системи транспортування заряджених частинок, що є джерелами електромагнітної енергії.

Серед можливих шляхів використання результатів дисертації можна назвати впровадження методу експериментального виявлення джерел мультипакторних розрядів у практику розробників ВЧ- та НВЧ-приладів, елементів і систем різного призначення. Варто розширити впровадження матеріалів дисертації у навчальний процес магістрантів і аспірантів за спеціальностями 010 – природні науки.

Зауваження та недоліки. Підтверджуючи обґрунтованість висновків і отриманих результатів, необхідно зробити наступні зауваження:

1. Четвертий пункт новизни сформульовано суперечливо, що не дозволяє усвідомити його суть. З одного боку, автор стверджує, що умови множення електронів вторинної емісії між електродами відсутні, коли енергія електронів нижче граничного значення. І при цьому, з іншого боку, він стверджує, що у складі загального електронного струму, що зареєстрований циліндром Фарадея на виході ЛПП, присутні струми, які формуються електронами вторинної емісії як з меншими, так і з більшими енергіями (за всією наявністю, щодо граничного значення). Як видно, протиріччя на

обличчя. Так, де і в чому ж новизна?

2. На рисунку 4.1 (стор. 87) якісна залежність коефіцієнта вторинної електронної емісії від енергії первинних електронів представляється як експериментальна, яка запозичена з книги Добрецова Л.М. [52]. Автору необхідно було б вказати хоча б значення енергій W_1 і W_2 , що характерні для первинних електронів в аналізованих вузлах малогабаритного прискорювача іонів МЛУД-3. Додаткову складність викликає різне позначення коефіцієнта вторинної електронної емісії як $K_{\text{ВЕЕ}}$ і $\delta(W)$ або $\delta(\sigma)$.
3. Як зазначено в дисертації, робота виконана в рамках двох бюджетних НДР, що проводяться в ННЦ "ХФТІ" з 2011 року. У цей період автором опубліковано 2 статті і 2 тез доповідей. Всі інші статті, а також авторські свідоцтва на винаходи опубліковано в період 1986–2010 рр. Дисертанту варто було б вказати всі НДР, починаючи з 1985 року.
4. Тексти дисертації і автореферату містять дуже довгі речення, що викликає труднощі розуміння суті висловлювань у читача. Автору варто було б висловлювати суть фізичних і математичних моментів більш чітко, коротко і лаконічно.
5. У роботі є велика кількість граматичних і стилістичних помилок. Як зазначено в авторефераті, матеріали по огляду літератури опубліковано в авторських свідоцтвах на винаходи [9, 10]. Роздратування викликає безглузда розстановка знаків пунктуації, особливо, ком між підметом і присудком.

Разом з тим, зазначені зауваження не порушують принципово суть роботи, не впливають істотно на кінцеві результати досліджень, що виконані автором, не зменшують наукову значимість та актуальність дисертації і не знижують високу оцінку наукового рівня дисертаційної роботи. Всі зауваження не позначаються на достовірності отриманих результатів з удосконалення ВЧ-системи, що збуджує Н-резонатор ЛПП при наявності мультипакторних ефектів. Вони є рекомендацією автору викладати свої результати чітко і аргументовано. В цілому, висловлені зауваження та зазначені недоліки не знижують загальну позитивну оцінку роботи.

Загальна оцінка роботи. Переходячи до загальної оцінки дисертації, варто відмітити, що вона видається закінченим і цілісним дослідженням, з чіткою структурою та логічним поданням матеріалу і свідчить про персональний внесок автора в науку. Вона присвячена розв'язку актуальної задачі фізики приладів, елементів і систем, яка пов'язана з експериментальними дослідженнями мультипакторних явищ у резонаторних структурах прискорювально-транспортних систем, що складають основу ЛПП. Результати дисертаційної роботи досить повно висвітлені в 21 публікації, які включають 8 статей, що опубліковані в журналах фахових видань України за спеціальністю 01.04.01, 2 авторських свідоцтва та 1 авторське свідоцтво-патент СРСР, а також 10 тез доповідей на міжнародних і всесоюзних конференціях, нарадах і семінарах. Дві статті, що опубліковані в журналі "Радіофізика та електроніка", видано англійською мовою в журналі США "Telecommunication and Radio Engineering", який включено до наукометричних баз Scopus і Web of Science. Аналіз публікацій

автора показав, що вони мають всі необхідні елементи, які підкреслюють повноту і глибину розкриття питань, що розглядаються. Робота має широку апробацію на наукових міжнародних 1 конференції та 3 семінарах, а також Всесоюзних 3 нарадах і 1 семінарі. Дисертація написана з використанням прийнятої в даній науковій сфері термінології достатньо зрозуміло і логічно. Стиль викладу матеріалу характеризується цілісністю, змістовною завершеністю, послідовністю і взаємозв'язком. Зміст і структура автореферату Л.Д. Лобзова в достатній мірі відповідають структурі, основним положенням і висновкам дисертації. Обсяг та оформлення дисертації відповідають існуючим вимогам.

Висновки по роботі в цілому. Дисертаційна робота Л.Д. Лобзова "Стабілізація збуджуваних ВЧ-полів у Н-резонаторі лінійного прискорювача іонів в умовах мультипакторних явищ" є завершеною працею. Відбиті в ній науково обґрунтовані результати про властивості вторинно-електронної емісії, що призводить до мультипакторних розрядів, у резонаторній структурі прискорювально-транспортної системи МЛПД-3, а також про стабілізацію аксіально-симетричних ВЧ-полів між трубками дрейфу пучка заряджених частинок, що супроводжується придушенням мультипакторних явищ у прискорювачі, є значним досягненням у розвитку фізики приладів, елементів і систем. За своєю актуальністю, новизною, науковою та практичною значущістю отриманих результатів дисертаційна робота задовольняє всім вимогам "Порядку присудження вчених ступенів", що пред'являються до кандидатських дисертацій за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем.

З урахуванням вищевикладеного вважаю, що Лобзов Леонід Дмитрович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за вказаною спеціальністю.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук

за спеціальністю радіофізика,

старший науковий співробітник


за спеціальністю фізика пучків заряджених частинок

і прискорювальна техніка,

провідний науковий співробітник відділу "Радіофізики твердого тіла"

Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

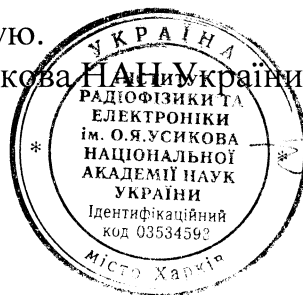
НАН України

 Ю. В. Прокопенко

Підпис Прокопенка Ю. В. засвідчую.

Учений секретар ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України,

канд. фіз.-мат. наук



І. Є. Почаніна

автора показав, що вони мають всі необхідні елементи, які підкреслюють повноту і глибину розкриття питань, що розглядаються. Робота має широку апробацію на наукових міжнародних 1 конференції та 3 семінарах, а також Весоюзних 3 нарадах і 1 семінарі. Дисертація написана з використанням прийнятої в даній науковій сфері термінології достатньо зрозуміло і логічно. Стиль викладу матеріалу характеризується цілісністю, змістовною завершеністю, послідовністю і взаємозв'язком. Зміст і структура автореферату Л.Д. Лобзова в достатній мірі відповідають структурі, основним положенням і висновкам дисертації. Обсяг та оформлення дисертації відповідають існуючим вимогам.

Висновки по роботі в цілому. Дисертаційна робота Л.Д. Лобзова "Стабілізація збуджуваних ВЧ-полів у Н-резонаторі лінійного прискорювача іонів в умовах мультипакторних явищ" є завершеною працею. Відбиті в ній науково обґрунтовані результати про властивості вторинно-електронної емісії, що призводить до мультипакторних розрядів, у резонаторній структурі прискорювально-транспортної системи МЛПД-3, а також про стабілізацію аксіально-симетричних ВЧ-полів між трубками дрейфу пучка заряджених частинок, що супроводжується придушенням мультипакторних явищ у прискорювачі, є значним досягненням у розвитку фізики приладів, елементів і систем. За своєю актуальністю, новизною, науковою та практичною значущістю отриманих результатів дисертаційна робота задовольняє всім вимогам "Порядку присудження вчених ступенів", що пред'являються до кандидатських дисертацій за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем.

З урахуванням вищевикладеного вважаю, що Лобзов Леонід Дмитрович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за вказаною спеціальністю.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук

за спеціальністю радіофізика,

старший науковий співробітник

за спеціальністю фізика пучків заряджених частинок

і прискорювальна техніка,

провідний науковий співробітник відділу "Радіофізики твердого тіла"

Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

НАН України

Прокопенко - Ю. В. Прокопенко

Підпис Прокопенка Ю. В. засвідчую.

Учений секретар ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України,

канд. фіз.-мат. наук



І. Є. Почаніна