

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

**Лобзов Леонід Дмитрович**

УДК 621.384.6

**СТАБІЛІЗАЦІЯ ЗБУДЖУВАНИХ ВЧ ПОЛІВ У  
Н-РЕЗОНАТОРІ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ІОНІВ  
В УМОВАХ МУЛЬТИПАКТОРНИХ ЯВИЩ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАНУ.

**Науковий керівник:** кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник  
**Шуліка Микола Георгійович,**  
начальник відділу розробки лінійних прискорювачів іонів для пучкових технологій;  
Інститут плазмової електроніки та нових методів прискорювання Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАНУ.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Прокопенко Юрій Володимирович,**  
Інститут радіофізики та електроніки  
імені О.Я. Усикова НАНУ,  
провідний науковий співробітник.

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Грицунов Олександр Валентинович,**  
Харківський Національний Університет  
Радіоелектроніки, професор кафедри  
мікроелектроніки, електронних приладів  
та пристроїв.

Захист дисертації відбудеться « 18 » квітня 2019 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 при Харківському Національному Університеті Радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Харківського Національного Університету Радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розісланий « 12 » березня 2019 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Е.А. Разумов-Фрізюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Лінійні прискорювачі іонів (ЛПІ), на базі об'ємних циліндричних резонаторів з трубками дрейфу, що спочатку розроблялися як інструмент для фундаментальних досліджень у ядерній фізиці та фізиці елементарних частинок, мають великий попит і у прикладних застосуваннях – медицині, матеріалознавстві та інших областях народного господарства.

При створенні таких прискорювачів іонів, важливо щоб між трубками дрейфу були відсутні будь які явища, що дестабілізують параметри резонатора. Але при збудженні в ньому ВЧ полів, з паралельних торців трубок, автоматично виникає вторинно-електронна емісія (ВЕЕ) електронів, що множаться, приводячи до вторинно-електронних резонансних розрядів (ВЕРР) (англ. терм. – *multipactor effect*<sup>1</sup>).

В зазначених умовах існування мультипакторних явищ між паралельними торцями трубок дрейфу, прискорення пучків іонів неможливо. Якщо спад ВЧ напруг і полів зупинити будь яким методом, то ефект зникає. Але струми електронів та їх енергії досліджувались не достатньо<sup>2</sup>.

На сьогодні є досить багато підібраних експериментально методів пригнічення мультипакторних розрядів у традиційних ЛПІ. Однак це не сприяє збільшенню ефективності ЛПІ з традиційними ВЧ генераторами та автоколивальними системами.

Альтернативою відомим методам пригнічення умов множення електронів ВЕЕ між паралельними електродами, є застосування власних ВЧ напруг, відгалужених з основних елементів ВЧ системи – резонатора і фідера, що складаються у мостовому пристрої та надходять до входу підсилювального каналу (ПК). Безперервне збільшення результуючих ВЧ напруг у резонаторі, забезпечує найкращі умови для стабілізації азимутально-симетричних ВЧ полів між трубками дрейфу. ПК може бути з'єднаним і будь яким одним позитивним зворотнім зв'язком (ПЗЗ) з резонатором або фідером.

Раніше, на основі спрощеної схеми, було запропоновано теорію механізму ВЧ розряду між паралельними електродами діодного проміжку (ДП), ізольованого від будь якої резонаторної структури<sup>3</sup>. Основним припущенням такої теорії була емпірична можливість вторинно-електронна емісія електронів з електродів діодного проміжку. Однак в цьому експерименті неможливо заздалегідь передбачити залежність коефіцієнтів ВЕЕ паралельних електродів ДП, від різних значень змінних напруг ВЧ джерела.

З вищевикладеного виходить, що розробка нових ВЧ систем і методів стабілізації збуджуваних ВЧ полів у резонаторних структурах ЛПІ, та керування умовами пригнічення множення електронів між паралельними

<sup>1</sup> Альварец Л. Берклеевский протонный линейный ускоритель / Л. Альварец, Г. Браннер, Дж. Франк и др. // Проблемы современной физики. 1956. №2. С. 99–137.

<sup>2</sup> Бобылев В.И. Линейный ускоритель протонов И-2. IV. Система ВЧ питания / В.И. Бобылев, Ю.Д. Иванов, А.В. Мищенко и др. / ПТЭ. 1967. №5. С. 34–39.

<sup>3</sup> Hatch A.J. The Secondary Electron Resonance Mechanism of Low Pressure High Frequency Gas Breakdown / A.J. Hatch, H.B. Williams // J. Appl. Phys. 1954. Vol. 25, №4. P. 417–423.

торцями трубок дрейфу, для прискорення інтенсивних пучків іонів, є актуальною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Результати, що становлять основу дисертації, отримані в ННЦ ХФТІ в рамках виконання планових бюджетних науково-дослідних робіт за такими програмами:

1) Програма, що виконувалась за Постановою Бюро Відділення ядерної фізики й енергетики НАН України від 7 жовтня 2010 року в рамках теми: «Розробка та дослідження методу забезпечення стійкості руху іонів з просторово поєднаними змінно-фазовим та магнітним фокусуванням у лінійних прискорювачах електроядерних установок», (шифр теми III-6-11) ШЕНМП ННЦ ХФТІ, (2011–2015), № г/р – 0111U009560.

2) Програма, що виконується за Постановою Бюро Відділення ядерної фізики й енергетики НАН України від 1 липня 2015 року в рамках теми: «Розробка та дослідження Н-резонаторів лінійних прискорювачів іонів для радіаційних технологій. Дослідження та застосування параметричного рентгенівського випромінювання релятивістських частинок та мініатюрних прискорювачів» (шифр теми III-7-16) ШЕНМП ННЦ ХФТІ, (2016–2020), № г/р-0116U006491.

Дисертант у зазначених роботах виступав виконавцем.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи, є фізичне обґрунтування вибору генераторної ВЧ системи для резонансного ЛПП, яка б забезпечувала стабілізацію збуджуваних аксіально-симетричних ВЧ полів між трубками дрейфу та пригнічення мультипакторних явищ.

Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити **наступні задачі:**

– розробити та виготовити нову ВЧ систему для ЛПП, яка б забезпечувала стабілізацію аксіально-симетричних ВЧ полів між трубками дрейфу, так і пригнічення множення електронів ВЕЕ між їх торцями.

– провести вивчення спотворення форм імпульсів ВЧ напруг резонатора, збуджуваних різними ВЧ системами, при мультипакторних розрядах у різних його областях.

– запропонувати електричну модель ДП, де можуть бути ураховані активні витрати ВЧ енергії, що витрачається на існування електронів ВЕЕ.

– розглянути залежність коефіцієнтів ВЕЕ ( $K_{ВЕЕ}$ ) паралельних електродів ДП, від значень енергій електронів, що падають на них (у статусі первинних), попередньо характеризуючи їх коефіцієнти ВЕЕ ( $K_{ВЕЕ}$ ), як  $K_{ВЕЕ} > 1$ , так і  $K_{ВЕЕ} < 1$ .

– розробити, виготовити, змонтувати прилади та елементи, необхідні для нової ВЧ системи, узгодженої з хвильовим опором коаксіального фідеру, з вхідним опором ЛПП, та настроїти її у режим стабілізації ВЧ полів, збуджуваних у резонаторі.

**Об'єктом дослідження** є лінійний прискорювач іонів на базі Н-резонатора.

**Предметом дослідження** є процеси стабілізації аксіально-симетричних ВЧ полів між трубками дрейфу, в умовах існування мультипакторних явищ між їх торцями, габарити яких більше зазорів між ними.

**Методи дослідження.** При розв'язанні зазначених завдань використовувалися відомі аналітичні та експериментальні методи фізики пучків

заряджених частинок, фізики приладів, елементів і систем, фізики та техніки високих і надвисоких частот. Для теоретичного дослідження значень електричних енергій електронів ВЕЕ, що емітують у ВЧ-НВЧ полях з одного електрода ДП, проходять різні різниці потенціалів та падають (у статусі первинних) на другий електрод, попередньо збуджуючи більше електронів ніж число падаючих, використовувалися апробовані методи теоретичних основ радіотехніки та електронної оптики, що засновані на розв'язанні диференціальних рівнянь 2-го порядку руху електронів у формі Ньютона.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Уперше розроблена ВЧ система для стабілізації аксіально-симетричних полів між трубками дрейфу малогабаритного лінійного прискорювача дейтронів (МЛПД-3), у якій робота потужного ПК регулюється напругами 2-ох незалежних позитивних зворотних зв'язків (ПЗЗ), що відгалужені із резонатора та фідера.

2. Уперше запропоновано експериментальний метод дослідження конкуренції стабілізованих ВЧ коливань та умов розвитку мультипакторних явищ у ЛПП, збуджуваного новою ВЧ системою. На основі аналізу викривлених імпульсів ВЧ напруг ЛПП та загальних вторинно-електронних струмів, що реєструються на виході з нього, метод допоміг зрозуміти, що у ньому існують ще й паразитні ВЕ розряди на периферії, що унеможлиблює зростання ВЧ напруг і полів з найменших значень.

3. Отримала подальший розвиток модель діодного проміжку, шунтованого активним опором вторинно-електронної (ВЕ) мультипакції, у складі лампового тріода і окремого резонансного контуру. Для такої ВЧ системи з додатково існуючим опором ВЕ мультипакції, визначені:

– загальні вирази для ВЧ напруг і полів, збуджуваних у контурі та між паралельними електродами ДП, і для кругової частоти коливань;

– вирази відносних значень енергій електронів ВЕЕ, що проходять різні різниці ВЧ потенціалів у півперіодах фаз ( $0-180^\circ$ ), та переміщуються з одного електрода діодного проміжку на другий, при їх загальному наростанні або спаданні у резонансному контурі.

4. Уперше встановлено, що умови множення між паралельними електродами електронів вторинно-електронної емісії за межами їх найменших енергій, відсутні. При цьому показано, у складі ВЧ імпульсу загального електронного струму, що виходить з ЛПП та реєструється циліндром Фарадея, присутні електрони ВЕЕ, як з найменшими, так і з більшими значеннями енергій.

**Практичне значення одержаних результатів:** Результати наведених в дисертації експериментальних досліджень стабілізації збуджуваних ВЧ напруг і полів у ЛПП, для ефективного прискорення пучків іонів, мають загальний характер і можуть бути використані при розробці новітніх прискорювачів заряджених частинок, для вирішення фундаментальних проблем фізики високих енергій, створення компактних і значно простіших і дешевших ЛПП для промисловості, медицини, матеріалознавства, а також вдосконалення існуючої ВЧ техніки для народного господарства.

Використання нової ВЧ системи, де ПК з'єднаний 2-ма незалежними ПЗЗ з власними структурами (резонатором і фідером), дозволяє повністю розв'язати

проблему стабілізації збуджуваних аксіально-симетричних ВЧ полів між трубчастими електродами ЛПП. При цьому відмова від відомих методів пригнічення мультипакторних розрядів, дозволяє збільшити майже на порядок значення прискорених струмів пучків протонів або дейтронів.

**Особистий внесок здобувача** представлено в усіх опублікованих роботах [1–21], згідно з поставленими науковим керівником задачами, а саме: аналіз літературних даних; підготовка та проведення експериментів; проведення числових розрахунків; розробка різних ВЧ обладнань та елементів; спільно з співавторами проведення аналізу отриманих результатів; підготовка результатів до друку, написання статей та тез доповідей на міжнародні семінари та наради за темою дисертації.

У роботах [1, 11] – здобувач брав участь у розробці нової ВЧ системи для малогабаритного лінійного прискорювача іонів МЛПД-3, яка стабілізує аксіально-симетричні ВЧ поля між трубками дрейфу. У роботі [2] – здобувач запропонував спосіб пригнічення умов множення електронів ВЕЕ у ЛПП. У роботі [3] – готував обладнання для дослідження впливу мультипакторних явищ на стійкість стабілізованих ВЧ напруг і полів Н-резонатора. В роботах [4, 17, 7, 20], здобувач приймав безпосередню участь у виборі моделі ДП, шунтованого опором ВЕ мультипакції  $R_M$ , у складі відомої ВЧ системи лампового тріода і одинокого резонансного контуру. Для такої системи, з паралельно підключеним опором  $R_M$ , були визначені загальні вирази ВЧ-НВЧ напруг і полів та кругової частоти коливань. Здобувач теоретично розглянув енергії електронів ВЕЕ, що множаться між паралельними електродами, у півперіодах фаз ВЧ полів. У роботі [5, 18] – готував і брав участь у дослідженні методу керування мультипакторними явищами у ЛПП, у різних режимах роботи нової ВЧ системи. У роботі [6, 19] – здобувач брав участь у розробці ВЧ системи, для збудження ВЧ напруг і полів у 2-ох резонаторному прискорювачі, що створюється у ННЦ ХФТИ. У роботі [8, 21] – брав участь у дослідженні розвитку ВЕ розрядів у ЛПП, збуджуваного новою ВЧ системою, при виникненні на периферії резонатора ВЧ розряду, провокуючи мультипакторні явища між торцями трубок. У роботах [9, 10] – здобувач брав участь у розробці нових конструкцій елементів регулювання параметрів ЛПП, де відсутня їх паралельність з поверхнями будь яких його електродів та циліндричних стінок. У роботі [11] здобувач аналізував методи ВЧ пригнічення паразитних ВЕ розрядів у ЛПП, та оформленні авторського свідчення – патенту. У роботі [12, 14] – здобувач брав участь у дослідженнях впливів мультипакторних явищ при різних напругах резонатора, збуджуваного як стандартним генератором, так і новою ВЧ системою. У роботах [13, 15, 16] здобувач брав участь у дослідженнях впливу мультипакторних явищ на початку ВЧ тренування резонатора, у режимі роботи ПК з будь яким одним ПЗЗ, так і новою ВЧ системою.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи були представлені і отримали позитивний відгук на міжнародних конференціях та семінарах: XII Всесоюзном семінаре по лінійним ускорителям заряженных частиц, ФТИ МАЭП СССР и ХГУ имени А.М. Горького, г. Харьков, 1991 г. [14]; Тринадцатом совещании по ускорителям заряженных частиц,

г. Дубна, 1992 г. [15]; XIV совещании по линейным ускорителям заряженных частиц. г. Протвино, 1994 г. [16]; XIX Международный семинар по ускорителям заряженных частиц, г. Алушта, 2005 г. [17]; VI конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, ХФТИ и ИФВЭ и ЯФ, г. Харьков, 2008 г. [18]; XXI Международный семинар по ускорителям заряженных частиц, г. Алушта, Харьков, 2009 г. [19]; XXIII Международный семинар по ускорителям заряженных частиц, г. Алушта, Харьков, 2013 г. [20, 21].

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 8 статей у спеціалізованих фахових наукових виданнях України [1–8], що задовольняють вимогам ДАК МОН України до публікацій, на яких ґрунтується дисертація, 2 авторських свідоцтва [9, 10], 1 патенті [11], 2 статті [7, 8], опубліковані в спеціалізованих наукових виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз Scopus, 10 доповідей та тез на міжнародних семінарах та нарадах [12–21].

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів основного тексту з 26 малюнками та 1 таблицею, висновків та переліку використаних літературних джерел з 106 найменувань та додатку. Об'єм дисертації складає 138 сторінок, з них список використаних джерел займає 11 сторінок, 3 сторінки займає додаток.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **Вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок даної роботи з науковими програмами, планами, темами, визначені мета і задачі роботи. Наведені основні наукові результати, показана наукова новизна і можливість їх практичного застосування. Відображено особистий внесок здобувача в опублікованих, разом зі співавторами, наукових працях, та апробацію результатів, описано структуру та обсяг дисертаційної роботи.

**Перший розділ «Збудження ВЧ напруг і полів у лінійних прискорювачах іонів та методи пригнічення множення електронів ВЕЕ між паралельними торцями трубок дрейфу»** є оглядом літературних даних з основних процесів викривлення роботи резонансного прискорювача з мультипакторними здібностями електродів, при підключенні ВЧ джерела, з урахуванням яких сформовано загальні вимоги до ВЧ системи зі стабілізацією збуджуваних ВЧ полів, у ЛПП з корисними торцями трубок.

На основі проведеного аналізу запропоновано ряд спеціальних завдань, що можуть бути використані при експлуатації прискорювача МЛПД-3. З урахуванням вимог, пов'язаних зі зменшенням активних витрат у резонаторі, обумовлених умовами існування множених електронів ВЕЕ між торцями трубок дрейфу, було вибрано ВЧ систему, де підсилювальний канал з'єднаний 2-ма незалежними позитивними зворотними зв'язками<sup>4</sup> з Н-резонатором ЛПП та

<sup>4</sup> Лобзов Л.Д. Высокочастотный автогенератор / Л.Д. Лобзов, Ю.П. Мазалов, Н.Г. Шулика // Патент SU №1700783 А1. БИ №47. 1991. С. 239.

фідером. Також вивчені відомі експериментальні методи пригнічення мультипакторних явищ між торцями трубок дрейфу у ЛПІ і зроблено висновок що усі вони мало ефективні.

Матеріали цього розділу опубліковані у [9, 10].

**Другий розділ «Вплив мультипакторних процесів і розрядів на параметри резонансного ЛПІ»** містить опис: експериментального стенду на базі Н-резонатора прискорювача МЛПД-3 і діагностичного обладнання, яке було, виготовлено та використано при виконанні дисертаційної роботи.

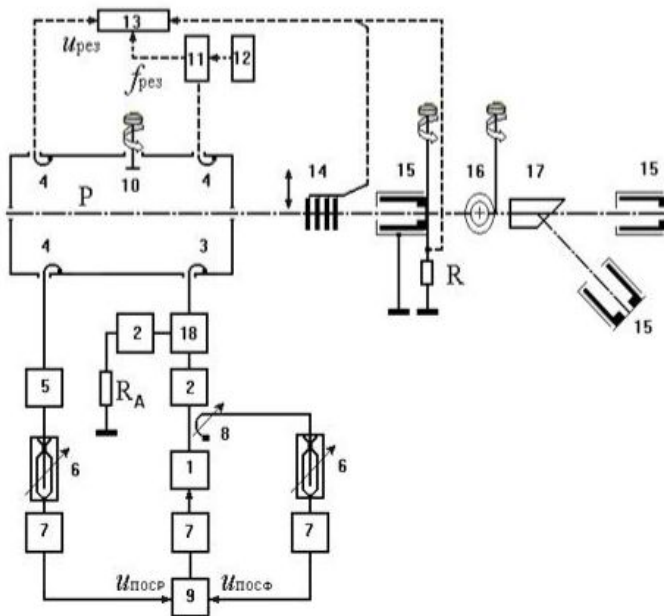


Рис. 1. Блок-схема нової ВЧ системи ЛПІ з 2-ма незалежними позитивними зв'язками з резонатором і фідером та контрольно-вимірювальною апаратурою

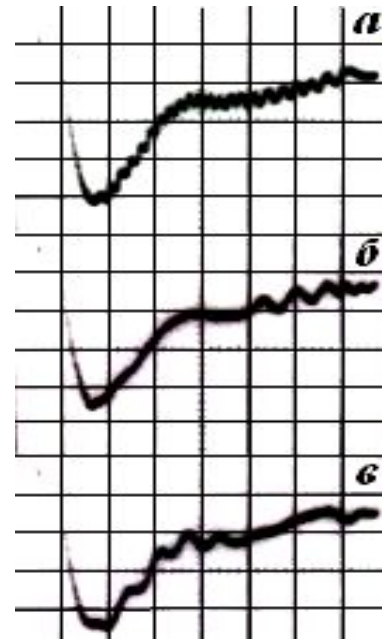


Рис. 2. Імпульси напруг частотного змішувача  $U_{чзм}$ , після  $\sim 11$  хвилин ВЧ тренування ЛПІ, у режимі ПК з одним ПЗЗР

На рис.1 представлено експериментальний стенд прискорювача МЛПД-3 з новою ВЧ системою. В основі ВЧ системи є ПК, з'єднаний 2-ма незалежними ПЗЗ, що працюють на резонатор Р прискорювача з високими електродинамічними параметрами: робочою частотою  $f \approx 100$  МГц, власною добротністю  $Q_0 \approx 5000$ , типу коливань –  $\pi$ . Елементи незалежних ПЗЗ, 4 і 8 встановлені у вакуумному резонаторі і у повітряному коаксіальному фідері 18. ВЧ мостове обладнання 9, забезпечує підсумовування напруг 2-х ПЗЗ та передачу їх на вхід ПК.

На рис. 2(а-в) показано вплив мультипакторних розрядів на стійкість параметрів МЛПД-3, збуджуваного ПК з одним ПЗЗ з резонатором (ПЗЗР). У цьому режимі, при виникненні вказаних розрядів, імпульси ВЧ напруг резонатора не можуть бути зареєстровані, оскільки збігаються з лінією розгортання променя осцилографа. Однак виділення нульових «биттів» на початку (2б) та у подальшій частині (2в) імпульсу ВЧ напруги частотного змішувача  $U_{чзм}$ , дозволило виміряти значення 2-х частот  $f_1 = 98,226$  МГц та  $f_2 = 98,196$  МГц, при резонансній частоті ЛПІ  $f_{рез} = 98,146$  МГц. Т.ч., стало



зрозуміло, що резонансна частота ЛПП, збуджуваного ПК, з'єднаного ПЗЗ з резонатором, залежить від інтенсивності струмів електронів ВЕЕ.

На рис. 3(а-г) наведені осцилограми, що характеризують викривлення імпульсів ВЧ напруг резонатора  $U_{РЕЗ}$  та ВЧ напруг падаючих хвиль  $U_{ПАД}$  у фідері, при паразитних розрядах у ЛПП, збуджуваного ПК з одним ПЗЗ з фідером (ПЗЗФ), які також залежать від інтенсивності струмів електронів ВЕЕ. Одночасні зриви на ВЧ імпульсах  $U_{РЕЗ}$  і  $U_{ПАД}$ , на протязі їх тривалості дозволяють утверджувати, що і цей метод ВЧ збудження ЛПП, не є стійким.



Рис. 3. Викривлення імпульсів ВЧ напруг резонатора і падаючих хвиль фідера, де лінійний прискорювач іонів збуджується ПК з ПЗЗ з фідером, на початку ВЧ тренування трубок дрейфу, забруднених атмосферними газами

На рис. 4(а-г) наведені осцилограми зривів імпульсів стійких ВЧ напруг  $U_{РЕЗ}$  і загальних струмів ВЕЕ  $I_{ВЕЕ}$  з торців передостанніх зазорів між трубками дрейфу прискорювача МЛПД-3, збуджуваного новою ВЧ системою (ПК з ПЗЗР+ПЗЗФ). Це відбувається в умовах не завершеного ВЧ тренування торців трубок дрейфу і інших поверхонь ЛПП, коли ВЕЕ властивості їх матеріалу, як і будь-якого електронного емітера<sup>5</sup>, ще не стали власними.

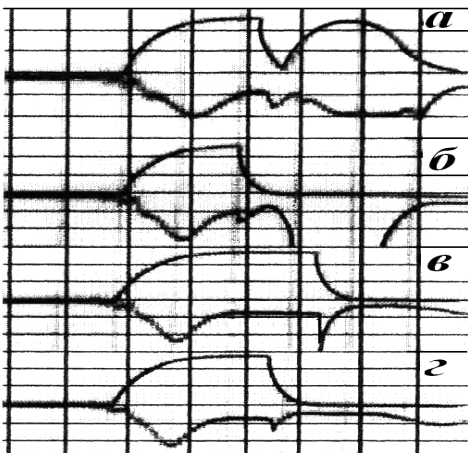


Рис. 4 (а-г) Осцилограми зривів нормальних форм імпульсів ВЧ напруг резонатора  $U_{РЕЗ}$  (верхні) і струмів ВЕЕ  $I_{ВЕЕ}$  (нижні) з паралельних торців передостанніх зазорів між трубками дрейфу прискорювача іонів, збуджуваного новою ВЧ системою, на завершальній стадії ВЧ тренування.

На рис. 4(б) ми убачаємо, що при спаді імпульсу ВЧ напруги резонатора до найменших значень, електрони ВЕЕ між паралельними електродами, мають умови інтенсивного множення. Це підтверджує, що множення електронів ВЕЕ з паралельних електродів резонансного прискорювача, при наростанні та спаду ВЧ напруг і полів, здійснюється при їх найменших значеннях.

<sup>5</sup> Айнбуд М.Р. Вторично-электронные умножители открытого типа и их применение / М.Р. Айнбуд, Б.В. Поленов. – М.: «Энергоиздат», 1967. – 138 с.

На рис. 5 (верхня пара) наведені імпульси стабілізованих ВЧ напруг резонатора  $U_{PE3}$ , збуджуваного новою ВЧ системою і повних струмів  $I_{BEE}$ , що реєструються на виході ЛПП цифровим осцилографом високої чутливості.

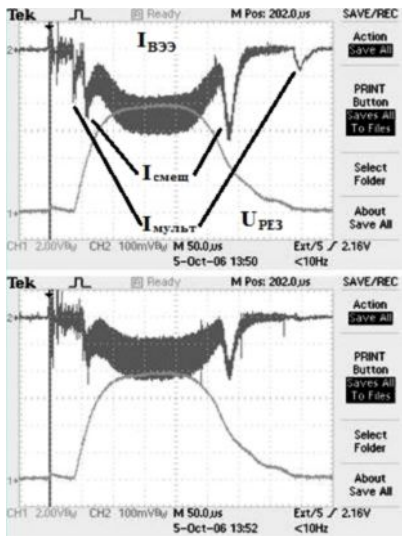


Рис. 5. Імпульси нормальних форм ВЧ напруг резонатора  $U_{PE3}$  (нижні) і повних струмів ВЕЕ  $I_{BEE}$  (верхні).

Верхні:  $I_{BEE}$  – імпульс повного струму ВЕЕ;  $I_{МУЛЬТ}$  – мультипакторні струми електронів найменших енергій;  $I_{ЗМЩ}$  – ВЕ струми зміщення ( $dU_{PE3}/dt$ ).

Нижні: – імпульс повного струму  $I_{BEE}$  та струми зміщення  $I_{ЗМЩ}$ , що проходять через алюмінієву мішень, товщини 5 мк.

Мультипакторні струми  $I_{МУЛЬТ}$ , на фронтах імпульсу  $U_{PE3}$ , поглинуті у мішені.

При цьому у складі повного імпульсу  $I_{BEE}$ , присутні такі часткові струми:

- мультипакторні струми ВЕЕ  $I_{МУЛЬТ}$ , що виникають при короточасному множенні та зменшенні електронів найменших енергій, на початку переднього та у кінці заднього фронтів імпульсу ВЧ напруги  $U_{PE3}$ ;
- ВЕ струми зміщення  $I_{ЗМЩ}$ , що утворюються на протязі повних переднього та заднього фронтів імпульсу ВЧ напруги  $U_{PE3}$ ;
- ВЕ струми електронів більших енергій, що виникають відповідно до імпульсів максимальних ВЧ напруг  $U_{PE3}$ .

Чіткі форми ВЕ струмів на повному імпульсу  $I_{BEE}$ , при найменших напругах  $U_{PE3}$ , та на його повних значеннях (верхні), сприяли використанню методу виміру енергій електронів ВЕЕ, за допомогою металевих мішень, які встановлювались на виході з ЛПП, попереду ЦФ. На рис.5 (нижні), при стабілізації імпульсів ВЧ напруг резонатора  $U_{PE3}$ , показано змінення значень повних струмів ВЕЕ  $I_{BEE}$ , що проходять крізь алюмінієву мішень, а електрони найменших енергій  $I_{МУЛЬТ}$ , повністю поглинуті в мішені, товщини 5мкм. Відповідно на 20% зменшились і струми зміщення  $I_{ЗМЩ}$  та повних струмів  $I_{BEE}$  електронів великих енергій. Тобто, одночасно виміряні імпульси стабілізованих ВЧ напруг  $U_{PE3}$  і повних струмів електронів ВЕЕ  $I_{BEE}$ , визначають, що множення електронів найменших енергій, між торцями трубок, припинено.

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах [3, 12–13, 15–16].

У третьому розділі «Мультипакторні процеси і розряди між електродами прискорювальних зазорів та на периферії ЛПП» представлені результати грубого викривлення роботи прискорювача МЛПД-3, збуджуваного новою ВЧ системою, при штучному виникненні на периферії резонатора паразитного розряду, що й провокує мультипакторні процеси і розряди в усіх прискорювальних зазорах.

На рис. 6 представлені викривлення імпульсів ВЧ напруг резонатора  $U_{PE3}$  і струмів електронів ВЕЕ  $I_{BEE}$ , що виходять з ЛПП, збуджуваного новою ВЧ

системою і нормально працюючого на протязі довготривалого часу, було виявлено на черговій робочій зміні його ВЧ тренування.

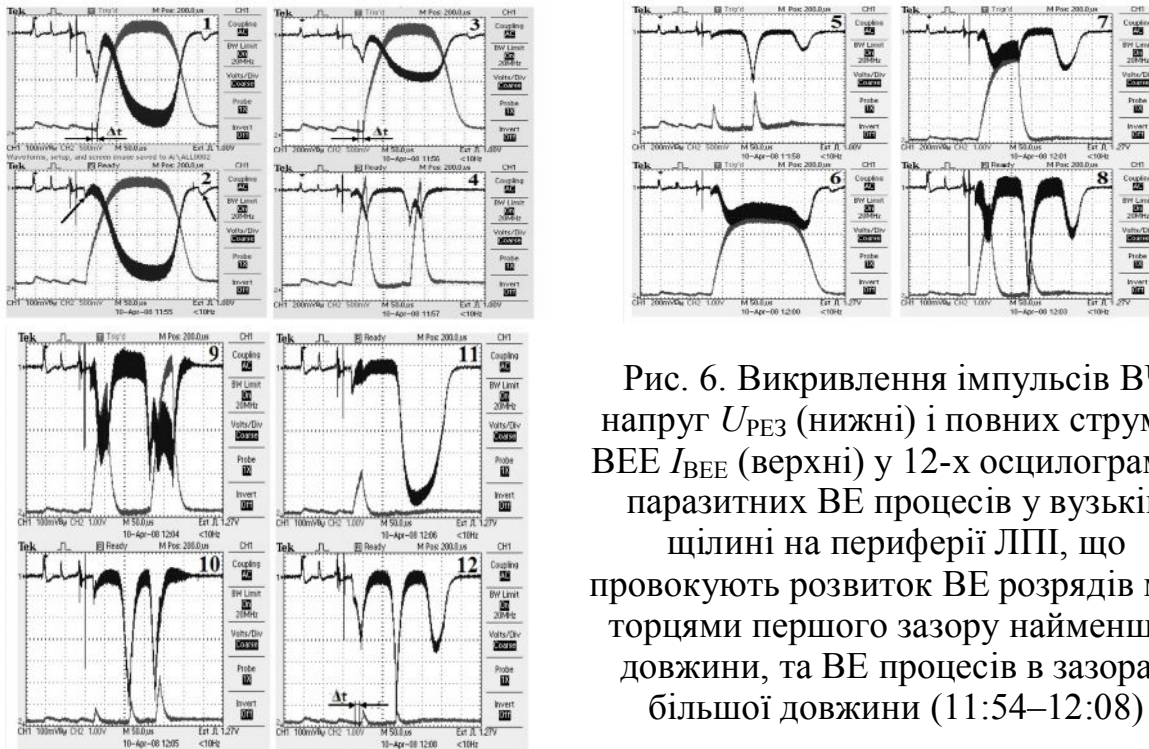


Рис. 6. Викривлення імпульсів ВЧ напруг  $U_{PEZ}$  (нижні) і повних струмів ВЕЕ  $I_{BEE}$  (верхні) у 12-х осцилограмах паразитних ВЕ процесів у вузькій щілині на периферії ЛПІ, що провокують розвиток ВЕ розрядів між торцями першого зазору найменшої довжини, та ВЕ процесів в зазорах більшої довжини (11:54–12:08)

При цьому у перших прискорювальних зазорах та на периферії резонатора, спостерігалось, крізь оглядові вікна, світло від обох розрядів. Цікаво було знати, а як при цьому викривлюються імпульси ВЧ напруг резонатора  $U_{PEZ}$  та реальних струмів ВЕЕ  $I_{BEE}$ . З метою вивчення що відбувається, були зареєстровано 12 (рис. 6) парних імпульсів ВЧ напруг  $U_{PEZ}$  і повних струмів ВЕЕ  $I_{BEE}$ , на протязі 15 хвилин ВЧ тренування (11:54–12:08). На початку ВЧ тренування (осц. 1–4, 11:54–11:57), при майже сталої роботі нової ВЧ системи прискорювача, викривлення імпульсів ВЧ напруг  $U_{PEZ}$  і повних струмів ВЕЕ  $I_{BEE}$  були зовсім незначні. Але наступні викривлення імпульсів ВЧ напруг  $U_{PEZ}$  і повних струмів ВЕЕ  $I_{BEE}$  є досить грубими (осц. 5–8, 11:58–12:03). Тобто, наявність мультипакторних сплесків  $I_{МУЛЬТ}$ , на початку імпульсів ВЧ напруг  $U_{PEZ}$  (осц. 6, 7), указує на те, що їх множення і пригнічення відбувається майже нормально. При подальшому спаді ВЧ напруг, обумовленому імовірним розвитком розряду на периферії, відзначається збільшення струмів ВЕЕ, що виходять з ЛПІ.

Наприкінці ВЧ тренування (осц. 9–12, 12:04–12:08), спостерігаються слабкі спроби наростання імпульсів ВЧ напруг  $U_{PEZ}$ . При цьому мультипакторні струми  $I_{МУЛЬТ}$ , на імпульсі повного струму  $I_{BEE}$  зовсім відсутні. А протягом заднього фронту ВЧ імпульсу  $U_{PEZ}$ , утворюються значні струми електронів ВЕЕ, що множаться.

Таким чином, множення електронів ВЕЕ у вузькій щілині на периферії Н-резонатора, та між торцями трубок, можуть вважатися ідентичними явищами, що потребує прийняття мір з ліквідування паразитної щілини на периферії прискорювального Н-резонатора.

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах [8, 21].

У четвертому розділі «Вторинно-електронна емісія електронів з електродів, на які падають електрони різних енергій, здобутих у полях постійних або ВЧ джерел» розглядаються різні значення енергій електронів, що попередньо здобуваються у повільно змінних електричних полях первинної електронної гармати або у змінних ВЧ полях.

Як відомо<sup>6</sup> (рис. 7) основною характеристикою ВЕЕ з мішені, що знаходиться під дією електричного потенціалу, на яку падають первинні електрони з енергіями  $W$ , є залежність її коефіцієнта ВЕЕ  $\delta$  від їх енергій. Повільна зміна енергій електронів від  $W_1$  до  $W_2$ , попередньо визначає її коефіцієнт ВЕЕ ( $\delta$ ), як  $\delta(W) > 1$ . При енергіях електронів  $W < W_1$  і  $W > W_2$ , коефіцієнт ВЕЕ цієї ж мішені попередньо визначається, як  $\delta(W) < 1$ .

На рис. 8, для теоретичного розгляду значень потенційних енергій електронів ВЕЕ у однорідних ВЧ електричних полях, представлена модель ДП, у складу відомої ВЧ системи одиночного резонансного контуру і тріода. Тут контур з динамічною добротністю  $Q \gg 1$  є джерелом ВЧ напруг, збуджуваних у ОРК, утворюючи між електродами ДП ємності  $C_K$  електричні поля  $E$ , наростаючих з найменших значень за законами експоненти.

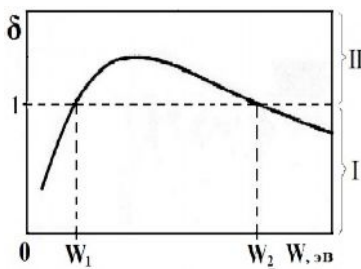


Рис. 7. Залежність коефіцієнта ВЕЕ мішені  $\delta$ , що знаходиться під дією потенціалу незалежного постійного джерела, на яку попередньо падають електрони з різними енергіями  $W$ , що змінюються з найменших значень, потенціалами первинної електронної гармати

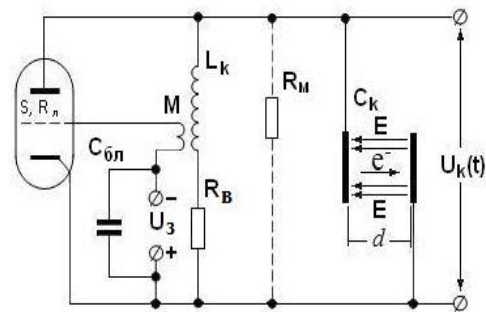


Рис. 8. ВЧ система одиночного резонансного контуру ( $L_K$ ,  $C_K$ ,  $R_B$ ) з тріодом ( $S$ ,  $R_n$ ) де електроди ємності  $C_K$ , розташованих на відстані  $d$ , є емітерами електронів ВЕЕ, витрачаючи ВЧ енергію, як активним опором ВЕ мультипакції  $R_M$ , що підключається до контуру

При цьому змінні значення енергій електронів, що емітують з одного електрода ДП з бігом фаз півперіоду, та падаючих на другий електрод, попередньо забезпечують збуджений стан його електронам, число яких більше ніж падаючих. У часі, протягом безперервних півперіодів, з кожного з електродів ДП, утворюється паралельне підключення до нього змінного опором ВЕ мультипакції  $R_M$ . При цьому вираження для наростаючих ВЧ-НВЧ напруг

<sup>6</sup> Бронштейн И.М., Фрайман Б.С. Вторичная электронная эмиссия // М.: Издательство «Наука». 1969. 407 с.

$U_K(t)$  та кругової частоти коливань  $\omega$  у ОРК, з додатково підключеним активним опором  $R_M$ <sup>7</sup>, можуть бути записані як,

$$U_K(t) = U_{HH} \cdot e^{\frac{\omega_0}{2Q_0} \left[ K_{II} \cdot K_{33} \frac{R_{EP}}{R_L} \frac{R_{EP}}{R_M} - 1 \right] t} \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_0^2} \left[ K_{II} \cdot K_{33} - \frac{R_{EP}}{R_L} - \frac{R_{EP}}{R_M} - 1 \right]^2}, \quad (2)$$

З формули (1) випливає, що вираження у квадратних дужках множника експоненти може характеризувати як наростання ВЧ напруг у контурі, так і їх спад. При цьому параметри вихідних напруг ВЧ системи, прикладених до ДП, повністю залежать від змінних значень  $R_M$  і характеристик елементів, що визначають динамічну добротність контуру як  $Q = Q_0 / (1 + R_{EP} / R_M)$ .

З формули (2) для частоти також очевидно, що для резонаторних структур з високими значеннями динамічної добротності  $Q$ , при  $R_M < \infty$ , зміна частоти власних коливань, незначна.

Енергії електронів ВЕЕ, при взаємодії з ВЧ-НВЧ електричними полями суворо заданої тривалості півперіодів, що наростають за законами експоненти<sup>8</sup>, визначимо за допомогою рівняння руху електронів в електричних полях, у формі Ньютона<sup>9</sup>, як

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = e \cdot E_{HP} e^{\alpha_H t} \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

де  $x$  відлічується від електрода, з якого емітують електрони ВЕЕ, проходять різні значення різниць потенціалів та падають на другий, а коефіцієнт  $\alpha_H = \omega / 2Q$  і  $Q = Q_0 / [K_{II} \cdot K_{33} - R_{EP} / R_L - R_{EP} / R_M - 1]$ , при  $K_{II} K_{33} / R_{EP} - 1/R_L - 1/R_{EP} > 1/R_M$ ;  $E_{HP}$  – початкова напруженість наростаючого поля між електродами ДП, що змінюється у часі;  $\varphi$  – початкова фаза.

Інтегруючи рівняння (3) двічі<sup>10</sup>, для довжини шляху переміщення електронів ВЕЕ одержуємо,

$$x = \frac{e}{m} \frac{E_{HP}}{(\alpha_H^2 + \omega^2)} \left\{ e^{\alpha_H t} \sin(\omega t + \varphi - 2\gamma) - \sin(\varphi - 2\gamma) \right\} + \frac{e}{m} \frac{E_{HP}}{\sqrt{\alpha_H^2 + \omega^2}} \sin(\varphi - \gamma) \cdot t \quad (4)$$

де  $\gamma = \arctg \omega / \alpha_H$  – кут, обумовлений виникненням ВЕЕ. Для структур з високою добротністю ( $Q_0 \gg 1$ ),  $\gamma \rightarrow 90^\circ$ . Виражаючи проходження електронами

<sup>7</sup> Месяцев П.П. Курс радиотехники / П.П. Месяцев, Н.С. Лившиц. – М.: УЧПЕДГИЗ. 1960. – 242 с.

<sup>8</sup> Hatch A.J. The Secondary Electron Resonance Mechanism of Low-Pressure High Frequency Gas Breakdown / A.J. Hatch and H.B. Williams. // J. Appl. Phys. 1954. Vol. 25. P. 417.

<sup>9</sup> Кельман В.М. Электронная оптика (издание второе) / В.М. Кельман, С.Я. Явор. М.-Л.: «Издательство Академии Наук СССР». 1963. – 362 с.

<sup>10</sup> Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г.Б. Двайт. – М.: «Наука», 1973. – 88 с.

різні різниці потенціалів між електродами ДП, через значення напруг  $U_{\text{HH}}$ , як  $U_{\text{HH}} = d \cdot E_{\text{HH}}$  і виходячи із граничних умов для усіх електронів (при  $t = 0$ , їх координати  $x = 0$ , а при  $t = T/2$ , їх координати  $x = d$ ) та відомих співвідношеннях для параметрів АС, у кінці півперіоду через динамічну добротність  $Q$  ( $\alpha_{\text{H}} t = \pi/2Q$ ;  $\omega/\alpha_{\text{H}} = 2Q$ ;  $\gamma = \arctg \omega/\alpha_{\text{H}} = \arctg 2Q$ ), для  $d$  одержуємо

$$d = \frac{e U_{\text{HH}}}{m \omega^2 d} \left\{ \frac{\pi}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2Q}\right)^2}} \sin(\arctg 2Q - \varphi) + \frac{1 + e^{\frac{\pi}{2Q}}}{1 + \left(\frac{1}{2Q}\right)^2} \sin(2\arctg 2Q - \varphi) \right\}. \quad (5)$$

Позначаючи співвідношення у фігурних дужках як  $G(\varphi, Q)$ , одержуємо аналітичне вираження, що зв'язує основні параметри електронів ВЕЕ, які переміщуються з одного електрода ДП на другий, у півперіодах ВЧ напруг

$$e U_{\text{HH}} \{G(\varphi, Q)\} = m(\omega d)^2. \quad (6)$$

Оскільки проміжок  $d$  між електродами ДП є дійсною величиною, а активні витрати в коливальному контурі характеризуються динамічною добротністю  $Q > 0$ , то забезпечення отриманої рівності можливо тоді, коли вираження  $G(\varphi, Q) > 0$ , тобто є модулем свого значення.

Слід зазначити, що величини  $e U_{\text{HH}}$  є значеннями потенційних енергій прискорених електронів, що проходять змінні різниці потенціалів в поточних фазах  $\varphi$  півперіодів ВЧ напруг ( $W_{\text{ПОТ}} = e U_{\text{HH}}$ ).

Тому що параметр ДП  $\omega d$  має розмірність швидкості, усередненої за півперіод  $\left(\omega d \approx \pi \frac{d}{1/2 \cdot T}\right)$ , то тут доречно ввести в розгляд значення  $W_{\text{КІН}} = m(\omega d)^2/2$ , що характеризує мінімальне значення кінетичної енергії для всіх електронів, що долають одну і ту ж відстань  $d$  між електродами ДП.

Уводячи також у розгляд їх відношення, як  $\sigma_1 = \frac{e U_{\text{HH}}}{m(\omega d)^2 / 2}$ , одержуємо

залежність відносних потенційних енергій електронів від фаз  $\varphi$  поточного півперіоду часу і динамічної добротності контуру,

$$\sigma_1 = 2 \left| \{G(\varphi, Q)\}^{-1} \right|. \quad (7)$$

На рис. 9 представлені графічні залежності  $\sigma_1(\varphi)$ , які відображають значення потенційних енергій прискорених електронів, що передаються при падінні електронам другого електрода, протягом фаз півперіоду  $\varphi$  ( $0-180^\circ$ ). В умовах динамічної добротності контуру  $Q \gg 1$ , це може бути записано як,

$$\sigma_1(\varphi) = \left| \left( \frac{\pi}{2} \cdot \cos \varphi + \sin \varphi \right)^{-1} \right|. \quad (8)$$

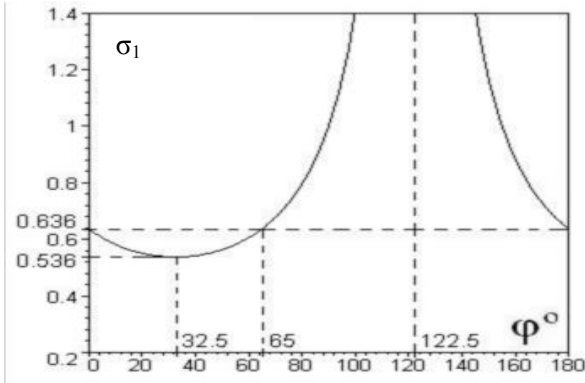


Рис. 9. Графічні залежності відносних значень потенційних енергій електронів ВЕЕ від фаз (0–180°) півперіоду напруг, що наростають у ОРК, попередньо визначаючи коефіцієнти ВЕЕ електродів ДП, при  $Q \gg 1$

Мала відмінність відносних значень потенційних енергій електронів у діапазоні  $0,536 < \sigma_1 < 0,636$ , дозволяє вважати їх майже однаковими. І незалежно від того, до яких значень збільшуються їх енергії, у початковому інтервалі фаз  $\varphi$  (0–65°), коефіцієнти ВЕЕ електродів, на який вони падають, визначаються як  $K_{ВЕЕ} > 1$ , а в залишкових фазах  $\varphi$  (65°–180°), як  $K_{ВЕЕ} < 1$ .

Розгляд потенційних енергій електронів ВЕЕ при їхній взаємодії з ВЧ полями, що спадають, ідентично розглянутому вище випадку. При цьому рівняння руху електронів також може бути записано у формі Ньютона, як

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = e \cdot E_{cn} e^{-\alpha_c t} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (9)$$

де коефіцієнт спаду  $\alpha_c = \omega / 2Q$ , а  $Q = Q_0 / (1 + R_{EP} / R_M)$  – динамічна добротність контуру з мультипакторними властивостями електродів ємкості  $C_K$  (ДП). Усі інші параметри аналогічні введеним раніше позначенням.

Інтегруючи також рівняння (8) двічі, з обліком згаданих раніше граничних умов для всіх електронів (при  $t = 0, x = 0$  і при  $t = T/2, x = d$ ), що й впливають з співвідношеннями для спадаючих напруг  $U_{CH} = d E_{CH}$ , і параметрів резонансного контуру, обумовлених динамічною добротністю  $Q$  ( $\alpha_c t = \pi/2Q$ ;  $\omega/\alpha_c = 2Q$ ;  $\gamma = \arctg \omega/\alpha_c = \arctg 2Q$  та при  $Q \geq 10$  з  $\gamma \rightarrow 90^\circ$ ), для  $d$  одержуємо,

$$d = \frac{e U_{CH}}{m \omega^2 d} \left\{ \frac{\pi}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2Q}\right)^2}} \sin(\arctg 2Q + \varphi) - \frac{1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}}{1 + \left(\frac{1}{2Q}\right)} \sin(2\arctg 2Q + \varphi) \right\}. \quad (10)$$

Позначаючи вираження у фігурних дужках величиною  $\Phi(\varphi, Q)$ , узяті по модулю, для потенційних енергій електронів, що здобуваються в момент кожної фази  $\varphi$  і фіксованих значеннях динамічної добротності резонансного контуру  $Q$ , одержуємо,

$$e U_{CH} |\Phi(\varphi, Q)| = m(\omega d)^2. \quad (11)$$

Уводячи в розгляд відношення зазначених енергій електронів  $\sigma_2$ , як  $\sigma_2 = \frac{e U_{CH}}{m(\omega d)^2 / 2}$ , з (10), також як і в наростаючих полях, одержуємо залежності

відносних потенційних енергій електронів від фаз півперіоду часу й добротності резонансного контуру  $Q$ ,

$$\sigma_2 = 2 \left| \Phi(\varphi, Q) \right|^{-1}. \quad (12)$$

При динамічній добротності контуру  $Q \gg 1$ , це може бути записано як,

$$\sigma_2(\varphi) = \left| \left( \pi/2 \cdot \cos \varphi + \sin \varphi \right)^{-1} \right|. \quad (13)$$

Із рис. 10 виходить, що електрони з енергіями (0,536–0,636), що падають на електроди ДП, попередньо визначають їх коефіцієнти ВЕЕ, як  $K_{ВЕЕ} > 1$ .

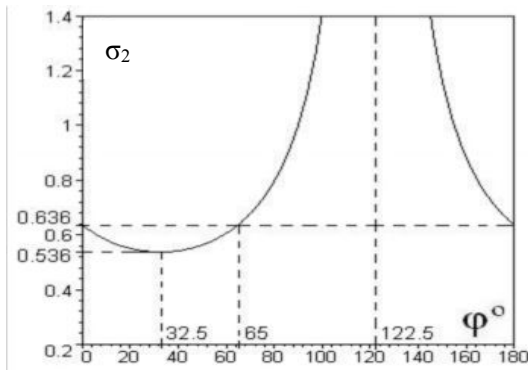


Рис. 10. Графічні залежності відносних значень потенційних енергій електронів ВЕЕ від фаз півперіодів ВЧ-НВЧ напруг і полів, що спадають у ОРК, попередньо характеризуючи коефіцієнти ВЕЕ електродів ДП, при значеннях динамічної добротності контуру  $Q \gg 1$

За межами діапазону зазначених енергій  $K_{ВЕЕ} < 1$ . Однак, на відміну від ВЕ процесів, що витрачають енергію контуру при наростанні ВЧ-НВЧ коливань, ВЕ процеси при їх спаданні, не виникають менше нижньої границі енергій електронів  $\sigma_2(\varphi) = 0,536$ .

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах [4, 7, 17, 20].

У п'ятому розділі «Керування мультипакторними процесами і розрядами у резонансному прискорювачі МЛПД-3» представлені осцилограми імпульсів ВЧ напруг резонатора  $U_{РЕЗ}$ , викривлених мультипакторними процесами і розрядами між трубками дрейфу.

На рис. 12 (а-з) показано ступінчате регулювання ВЧ напруг резонатора  $U_{РЕЗ}$  ЛПП, при номінальному значенні фаз і напруг ПЗЗ з резонатором, та номінальних значеннях фаз і змінних напругах на елементі ПЗЗ, установленому у фідері  $U_{ПЗЗФ}$ , від нуля до  $U_{ПЗЗФ} \geq 0,25U_{ПЗЗР}$ .

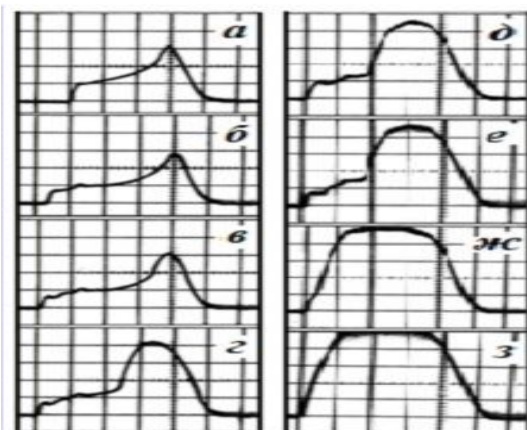


Рис. 12. Імпульси ВЧ напруг резонатора  $U_{РЕЗ}$ , викривлених ВЕ процесами і розрядами у перших зазорах ЛПП, при зміні кута ( $\psi$ ) петлі ПЗЗ у коаксіальному фідері, відносно силових магнітних ліній:  
а-з –  $U_{РЕЗ}$ , при кутах від  $\psi = 20^\circ$  до  $\psi = 90^\circ$



Зі збільшенням напруги на петлі ПЗЗФ, пригнічення умов множення електронів ВЕЕ продовжується, що й впливає з наповненням імпульсів ВЧ напруг  $U_{РЕЗ}$  (*a-ж*). При амплітуді напруги на петлі ПЗЗФ, обумовленої співвідношенням  $U_{ПЗЗФ} \approx 0,25U_{ПЗЗР}$  ( $\psi = 90^\circ$ ), умови множення електронів ВЕЕ майже повністю подавлені, (*з*) а форми переднього та заднього фронтів ВЧ імпульсу резонатора  $U_{РЕЗ}$  змінюються за законами експоненти.

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах [5, 18].

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливе наукове завдання зі збудження стабілізованих ВЧ і полів у ЛПП та отримання інтенсивних пучків іонів у лінійному прискорювачі протонів або дейтронів МЛПД-3. При цьому автоматично забезпечуються умови пригнічення паразитного множення електронів в однорідних ВЧ полях між паралельними торцями трубок дрейфу у Н-резонаторі з високими електродинамічними характеристиками.

Зокрема, виконано фізичне обґрунтування вибору генераторної ВЧ системи для прискорення пучків заряджених частинок у стабілізованих аксіально-симетричних ВЧ полях між трубками дрейфу, поперечні розміри корисних торців яких більше довжини зазорів між ними.

Основні результати та висновки, що отримано у дисертаційній роботі, полягають у наступному.

1. Уперше розроблена ВЧ система, для стабілізації аксіально-симетричних ВЧ полів між трубками дрейфу лінійного прискорювача іонів, у якій режим генерації підсилювального каналу (ПК) регулюється напругами 2-х незалежних позитивних зворотних зв'язків (ПЗЗ), що відгалужені з резонатора, та коаксіального фідера. Напруги зазначених ПЗЗ складаються у мостовому пристрою та надходять на вхід ПК. Безупинне зростання, з самого початку за законами експоненти, результуючих ВЧ полів у резонансному ЛПП, пригнічують умови множення електронів ВЕЕ між паралельними торцями трубок дрейфу.

2. Уперше запропоновано експериментальний метод дослідження конкуренції стабілізованих ВЧ коливань та умов розвитку мультипакторних явищ у малогабаритному лінійному прискорювачі дейтронів МЛПД-3, збуджуваного новою ВЧ системою. Метод дозволив:

– на основі аналізу викривлених імпульсів ВЧ напруг та повних струмів ВЕЕ, що виходять з передостаннього зазору ЛПП, стверджувати, що у резонаторі існують, ще й паразитні ВЕ розряди на його периферії;

– разом з провокуючими мультипакторними явищами, між торцями трубок дрейфу, вони унеможливають зростання ВЧ напруг і полів з найменших значень.

3. Отримала подальший розвиток модель діодного проміжку, шунтованого активним опором вторинно-електронної ВЕ мультипакції, у складі лампового тріода і окремого резонансного контуру. Для такої ВЧ системи з додатково існуючим активним опором вторинно-електронної мультипакції, визначені:

– загальні вирази ВЧ напруг і полів, збуджуваних в контурі, та між електродами діодного проміжку і кругової частоти коливань;

– вирази відносних значень енергій електронів вторинно-електронної емісії, що емітують з одного електроду ДП і падають на другий, при різних різницях ВЧ потенціалів кожного з півперіодів фаз ( $0-180^\circ$ ), наростаючих або спадаючих у контурі.

– побудовані графічні залежності відносних значень потенційних енергій електронів ВЕЕ від фаз окремого півперіоду коливань; показано, що у початкових інтервалах фаз ( $0-65^\circ$ ) півперіодів, відносні значення енергій електронів, падаючих на протилежний електрод ДП, мають найменші та майже однакові значення (0,536–0,636). А у залишкових фазах ( $65-180^\circ$ ) цих півперіодів, відносні енергії електронів збільшуються безперервно ( $> 0,636$ ).

4. Уперше встановлено, що умови множення між паралельними електродами електронів, за межами їх найменших енергій, відсутні. При цьому показано, що у складі ВЧ імпульсу загального струму ВЕЕ, що виходить з ЛПП та реєструється циліндром Фарадея, присутні:

– мультипакторні струми електронів з найменшими енергіями, що обумовлено короткочасним множенням та зменшенням їх числа, на початку переднього та майже у кінці заднього фронтів імпульсу ВЧ напруги резонатора;

– струми зміщення з більшими енергіями електронів, що обумовлено крутістю переднього та заднього фронтів імпульсу ВЧ напруги резонатора;

– звичайні струми електронів з високими енергіями, що обумовлено максимальними значеннями ВЧ напруги резонатора.

При цьому коефіцієнти ВЕЕ електродів ДП, попередньо характеризуються в початкових інтервалах фаз ( $0-65^\circ$ ), як  $K_{ВЕЕ} > 1$ , а в інтервалі залишкових фаз ( $65-180^\circ$ ), як  $K_{ВЕЕ} < 1$ .

Т.ч. доведено, що множення електронів ВЕЕ з електродів ДП з корисними паралельними торцями, в інтервалі фаз ( $0-65^\circ$ ), при збудженні півперіодів ВЧ напруг у резонансному контурі є реальним фізичним явищем.

В остаточному підсумку вирішена важлива наукова задача – прискорення інтенсивних пучків іонів у резонансному ЛПП, забезпечується стабілізованими аксіально-симетричними ВЧ полями у зазорах прискорювального резонатора з високими електродинамічними характеристиками. При цьому відмова від малоефективних методів пригнічення умов множення електронів ВЕЕ, дозволяє збільшити значення струмів інтенсивних пучків іонів більш ніж на порядок.

Результати, здобуті в дисертаційній роботі, дають можливість проектувати та виготовляти ефективні ВЧ системи, для стабілізації збуджуваних ВЧ напруг і полів, що прискорюють заряджені частинки, при розробці лінійних прискорювачів іонів для ядерно-фізичних досліджень, вирішення важливих завдань електроядерного виробництва енергії та трансмутації ядерних відходів. При цьому у резонаторах ЛПП, можливо застосування традиційних технологій виготовлення корисних діодних проміжків з паралельними поверхнями електродів, що є їх основними елементами.

## **СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Lobzov L.D., Shulika N.G. Self-excited generator system of RF-power supply on the one-section linear ion accelerator / Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations (39). 2001. №5. P. 157–159.

2. Lobzov L.D., Shulika N.G. Method of suppressing the multipactoring discharges / Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations (40). 2002. № 2. P. 93–94.

3. Лобзов Л.Д., Демченко П.А., Шулика Н.Г., Макарова Л.Н. и Овчинников А.В. Влияние мультипакторных разрядов на устойчивость установления автогенераторных ускоряющих полей однорезонаторного линейного ускорителя ионов / Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна. Серія фізична: «Ядра, частинки, поля». Харків. 2003. № 585. Вип. 1(21). С. 78–84.

4. Лобзов Л.Д., Толстолужский А.П., Шулика Н.Г. К теории мультипакторного разряда в вакуумированной ячейке линейного ускорителя / Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна. Серія фізична. «Ядра, частинки, поля». Харків. 2005. №657. Вип.1(26). С. 36–46.

5. Лобзов Л.Д., Шулика Н.Г., Белан В.Н. Управление мультипакторными разрядами в резонаторной структуре линейного ускорителя ионов / Радиофизика и Электроника. ИРЭ им. А.Я. Усикова. 2007. №3. С. 598–609.

6. Лобзов Л.Д., Шулика Н.Г. Автоколебательная система ВЧ возбуждения 2-х резонаторного ЛУИ / Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно фізическіе ісследовання (53). 2010. №2(66). Р. 44–47.

7. Lobzov L.D. Parameters of Secondary Electron Processes in Homogeneous HF-SHF Electric Fields of Resonator Structures / Telecommunications and Radio Engineering 2012. Vol.71. №14. P. 1271–1282.

8. Lobzov L.D., Shulika N.G., Kovalenko V.F. et al. Multipactor discharges in Gaps of the Acceleration Cannel and Other Areas of Resonator Structure of the Linear Ion Accelerator / Telecommunications and Radio Engineering 2015. Vol.74. №3. P. 247–259.

9. А.с. 1251782 А СССР МКИЗ Н 05 Н 9/4. Ускоряющая система линейного ускорителя ионов / Л.Д. Лобзов, Е.В. Гусев, Н.А. Хижняк, Н.Г. Шулика. №3798633/15-04; заявлено 05.10.84; зарегистрировано 15.04.86. 1986.

10. А.с. 1484274 А1 СССР МКИЗ Н 05 Н 9/4. Ускоряющая система линейного ускорителя ионов / Л.Д. Лобзов, Е.В. Гусев, Н.Г. Шулика, Н.А. Хижняк. – №4222927/19-01; заявлено 19.01.87; зарег. 01.04.89.

11. А.с.-патент 1700783 А1 СССР МКИЗ Н 05 Н 7/02. Высокочастотный автогенератор / Л.Д. Лобзов, Ю.П. Мазалов, Н.Г. Шулика. – №4483736/11-07; заявлено 11.07.88; зарег. 22.07.91, опубликовано в БИ №47. 1991. С. 239.

12. Лобзов Л.Д., Мазалов Ю.П., Гусев Е.В., Шулика Н.Г. Исследование мультипакторных разрядов в резонаторе Н-типа линейного ускорителя ионов // Труды XIII Совещания по ускорителям заряженных частиц в 2-х томах. Т.1. г. Дубна. 1993. С. 269-273.

13. Лобзов Л.Д., Шулика Н.Г. Мультипакторные разряды в Н - резонаторе линейного ускорителя ионов // XIV Совещание по ускорителям заряженных частиц. Сборник докладов в 4-х томах. Т.1. ИФВЭ. г. Протвино. 1994. С. 209–212.

14. Гусев Е.В., Лобзов Л.Д., и др. ВЧ автогенератор линейного ускорителя ионов // Тезисы 12-го Всесоюзного семинара по линейным ускорителям зараженных частиц. ХФТИ и ХГУ. 28-30 мая 1991. Харьков. С. 51.

15. Лобзов Л.Д., Мазалов Ю.П., Шулика Н.Г. Исследование мультипакторных разрядов в Н-резонаторе линейного ускорителя ионов //

XIII Совещание по ускорителям заряженных частиц, 13-15 октября 1992 г. Аннотации докладов. г. Дубна. 1992. С. 73.

16. Лобзов Л.Д., Шулика Н.Г. Мультипакторные разряды в резонаторе Н-типа линейного ускорителя ионов // XIV Совещание по ускорителям заряженных частиц, 25–27 октября 1994г. Аннотации докладов. г. Протвино. 1994. С. 31.

17. Лобзов Л.Д., Толстолужский А.П., Шулика Н.Г. Мультипакторный разряд в электрических полях вакуумированной ячейке ускорителя // Тезисы XIX Международного семинара по ускорителям заряженных частиц, 12–18 сентября 2005г., г. Алушта, г. Харьков. 2005. С. 71.

18. Лобзов Л.Д., Шулика Н.Г., Белан В.Н. Управление мультипакторными разрядами в резонаторной структуре линейного ускорителя ионов // Тезисы докладов VI конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 25–29 февраля 2008 г., г. Харьков. 2008. С. 94.

19. Лобзов Л.Д., Шулика Н.Г. Автоколебательная система ВЧ возбуждения 2-х резонаторного линейного ускорителя дейтронов // Тезисы XXI Международного семинара по ускорителям заряженных частиц, 6–12 сентября 2009 г., г. Алушта, г. Харьков. 2009.

20. Лобзов Л.Д. Энергетические параметры вторичных электронных процессов в однородных электрических полях ВЧ-СВЧ резонаторной структуры ЛУИ // Тезисы XXIII Международного семинара по ускорителям заряженных частиц, 8-14 сентября 2013г., г. Алушта, г. Харьков. 2013. С. 78.

21. Лобзов Л.Д., Шулика Н.Г., Коваленко В.Ф. и др. Мультипакторные разряды в зазорах ускоряющего канала и на периферии ЛУИ // Тезисы XXIII Международного семинара по ускорителям заряженных частиц, 8–14 сентября 2013 г., г. Алушта, г. Харьков. 2013. С. 80.

## АНОТАЦІЯ

**Лобзов Л.Д.** Стабілізація збуджуваних ВЧ полів у Н-резонаторі лінійного прискорювачі іонів в умовах мультипакторних явищ. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за фахом 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Харківський Національний Університет Радіоелектроніки, Харків, 2019.

У дисертаційній роботі приведені нові рішення важливої наукової задачі – збудження стійких ВЧ напруг і полів у малогабаритному лінійному прискорювачі дейтронів МЛПД-3 з трубками дрейфу, поперечні габарити торців яких більше, ніж довжина зазорів між ними.

Розроблено, виготовлено та настроєно нову ВЧ автоколивальну систему (АС) для прискорювача МЛПД-3, де підсилювальний канал (ПК) з'єднаний двома незалежними позитивними зворотними зв'язками з напругами резонатора (ПЗЗР) та падаючих хвиль фідера (ПЗЗФ).

Отримано оптимальне співвідношення ВЧ напруг ПЗЗР і ПЗЗФ, як  $U_{\text{ПЗЗФ}} \geq 0,25 U_{\text{ПЗЗР}}$ , для збудження стабілізованих ВЧ напруг резонатора та полів у зазорах між трубками дрейфу. Вивчені умови виникнення паразитних мультипакторних явищ у прискорювачі, при збудженні ПК будь-яким одним ПЗЗ. Або ними двома (ПЗЗР+ПЗЗФ) при ініціації явищ, що не є паразитними.

Для розгляду потенційних енергій електронів ВЕЕ, запропоновано модель ДП, шунтованого активним опором вторинно-електронної мультипакції  $R_M$ , що змінюється у часі, у складі відомої АС одиночного резонансного контуру (ОРК) і лампового тріода. Для такої АС з додатковим опором  $R_M$  визначені загальні вирази для ВЧ напруг і полів та кругової частоти коливань.

**Ключові слова:** лінійний прискорювач іонів, підсилювальний канал з двома незалежними позитивними зворотними зв'язками, діодний проміжок, ВЧ напруги і поля, вторинно-електронна емісія, мультипакторні явища.

## АННОТАЦІЯ

**Лобзов Л.Д.** Стабилизация возбуждаемых ВЧ полей в Н-резонаторе линейного ускорителя ионов в условиях мультипакторных явлений. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Харьковский Национальный Университет Радиоэлектроники, Харьков, 2019.

В диссертационной работе приведены новые решения важной научной задачи о стабилизации ВЧ полей в малогабаритном ускорителе дейтронов МЛУД-3 с трубками дрейфа, габариты торцов которых больше, чем зазоры между ними.

Разработана, новая ВЧ система для ускорителя МЛУД-3, в которой мощный усилительный канал (УК) охвачен двумя независимыми положительными обратными связями (ПОС) с напряжениями резонатора (ПОСР) и падающих волн коаксиального фидера (ПОСФ).

Получено оптимальное соотношение напряжений ПОСР и ПОСФ, как  $U_{\text{ПОСФ}} \geq 0,25 U_{\text{ПОСР}}$ , для возбуждения стабильных ВЧ полей между трубками дрейфа. Изучены условия умножения числа электронов вторично-электронной эмиссии (ВЭЭ) между трубками дрейфа ЛУИ, возбуждаемом в режиме работы УК с одной из указанных ПОС. Или подавление условий их умножения в режиме работы УК с ПОСР+ПОСФ.

С помощью вновь созданной ВЧ системы проведены исследования влияния мультипакторных процессов и разрядов на стабильность установления ВЧ полей в Н-резонаторе ЛУИ, возбуждаемых в разных режимах. Экспериментально показано, что мультипакторными явлениями в резонаторных структурах ЛУИ можно управлять путем регулирования амплитуд и фаз в каждой из цепей ПОС.

Изучены искажения импульсов ВЧ напряжений и общих вторично-электронных токов при мультипакторных процессах и разрядах на оси ускорителя, провоцируемых паразитными разрядами на его периферии. Разработанная методика исследований резонансных характеристик ЛУИ, основана на одновременной регистрации не только его нормальных или искаженных импульсов ВЧ напряжений резонатора, но и общих токов ВЭЭ, диагностируемых цилиндром Фарадея.

Для определения потенциальных энергий электронов ВЭЭ, предложена модель диодного промежутка (ДП), шунтируемого активным сопротивлением

ВЕ мультипакции  $R_M$ , в составе одиночного резонансного контура (ОРК) и лампового триода. Для такой ВЧ системы, определены общие выражения для ВЧ напряжений и круговой частоты колебаний.

Получены относительные величины потенциальных энергий электронов ВЕЕ, прошедших разные разности ВЧ потенциалов, нарастающих или спадающих в ОРК. При динамических добротностях  $Q \gg 1$  резонансного контура, построены графические зависимости коэффициентов ВЭЭ ( $K_{ВЭЭ}$ ) электродов ДП в течение фаз ( $0-180^\circ$ ) полупериода

Показано, что при относительно наименьших потенциальных энергиях ( $0,536-0,636$ ) электронов, падающих на электроды ДП, их коэффициенты ВЭЭ, в начальной части фаз ( $0-65^\circ$ ), предварительно определяются, как  $K_{ВЭЭ} > 1$ . При относительно больших потенциальных энергиях ( $> 0,636$ ) электронов, падающих на электроды этого ДП, их коэффициенты ВЭЭ в части фаз ( $65-180^\circ$ ), определяются, как  $K_{ВЭЭ} < 1$ .

**Ключевые слова:** линейный ускоритель ионов, усилительный канал с двумя независимыми положительными обратными связями, диодный промежуток, ВЧ напряжения и поля, вторично-электронная эмиссия, мультипакторные явления.

## ABSTRACT

**Lobzov L.D.** Stabilization of excited HF fields in the H-resonator of the ion linear accelerator under conditions of multipactor phenomenons. – Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Physics and Mathematics Science by speciality 01.04.01 – physics of devices, elements and systems – Kharkiv National University Radioelektroniks, Kharkiv, 2019.

The dissertation paper presents new solutions to the important scientific problem of stabilizing HF fields in the deuteron compact linear accelerator CLAD-3 with drift tubes, the transverse dimensions of the ends of which are larger than of the gaps between them.

A new RF self-oscillation system (SOS) for the accelerator CLAD-3, has been development, manufactured and set up in which a powerful amplifier channel is connection by two independent positive feedbacks from resonator voltages (PFBR) and incidence waves of a coaxial feeder (PFBF).

A optimization ratio of the voltage PFBR and PFBF, as  $U_{PFBF} \geq 0,25 U_{PFBR}$ , was obtained for the excitation of stable RF voltages and fields between the drift tubes. We studied the conditions for multiplying the number of electrons the SEE in the ILA with drift tubes, excited by the AS with one of these PFB, or their decrease in the mode of operation of the SOS with PFBR + PFBF.

For determination of the potential energies of electrons of secondary electron emission (SEE), a model of diode gap (DG), shunted by the active resistance of SE multipacting  $R_M$ , is proposed, as part of the known SOS – a single resonant contour with a lamp triode. For such RF system with active resistance  $R_M$ , the expressions for the RF voltages and the circular frequency of oscillations.

**Key words:** ion linear accelerator, amplifier channel with two independent positive feedback, diode gap, RF voltages and fields, SEE, multipactor phenomenons.

Підписано до друку 28.02.2019 р. Формат 60 × 84 1/16. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman Cyr. Віддруковано на ризографі.  
Ум.друк. арк. 0,9.  
Зам. № 48/19. Тираж 100 прим. Ціна договірна

**ВИДАВНИЦТВО**  
**Харківського національного автомобільно-дорожнього університету**

Видавництво ХНАДУ, 61002, Харків-МСП, вул. Ярослава Мудрого, 25.  
Тел. /факс: (057)700-38-64; 707-37-03, e-mail: rio@khadi.kharkov.ua

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення  
та радіомовлення України про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів  
видавничої продукції, серія ДК №897 від 17.04 2002 р.